

РАСПРЕДЕЛЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ МУЛЬТИАГЕНТНЫХ СИСТЕМ.

Ч. 2. Коллективный интеллект социальных систем

Ю.Л. Словохотов, Д.А. Новиков

Аннотация. Рассмотрены признаки и эмпирические характеристики распределенного интеллекта (РИ) как способности коллективного агента (социальной системы) воспринимать, обрабатывать и использовать информацию для достижения собственных объективных целей. Во второй части обзора обсуждаются реализации РИ в системах, состоящих из людей: «разум толпы» в неструктурированных сообществах, а также коллективный интеллект малых групп, организационных систем (ОС) и больших систем – государств, народов и цивилизаций в историческом времени. В отличие от роевого РИ, индивидуумы, составляющие коллективный интеллект в человеческих сообществах, способны к глубокой переработке информации и творческой деятельности. Подчеркнута неразрывная взаимосвязь РИ таких систем с индивидуальным человеческим интеллектом; на примере гибкого управления ресурсами в реальном времени отмечен возрастающий вклад ИИ в современный коллективный интеллект. Перечислены факторы, определяющие эффективность РИ мультиагентной системы: когнитивные возможности индивидуумов, структура взаимодействий между ними, коллективное целеполагание, запись, свертывание и обработка внешней информации, создание новых образов окружающей среды и себя в ней. Рассмотрена модульная модель восприятия внешних воздействий.

Ключевые слова: мультиагентные системы, коллективный интеллект, группы, организационные системы, большие системы, модульная модель восприятия.

ВВЕДЕНИЕ

Изучение интеллектуальной деятельности человека, ее математическое и техническое моделирование – магистральные направления когнитивной психологии, информационных технологий, кибернетики, робототехники и ряда других наук [1]. В этих областях установлены ключевые качества, общие для интеллекта человека (англ. *human intelligence*, HI), элементов интеллектуальной деятельности животных, компьютерных реализаций искусственного интеллекта (ИИ; англ. *artificial intelligence*, AI) и распределенного интеллекта (РИ, англ. *distributed intelligence*, DI) мультиагентных систем. Это автономность агентов (в том числе коллективных), восприятие информации («отражение» внешних воздействий), ее обработка и обобщение (свертывание), обучаемость, использование информации для достижения объективных целей агента в изменяющейся внешней обстановке и ряд более частных признаков. Исследования РИ включают изучение и моделирование кооперативных эффектов в разнообразных мультиагентных

системах: биологических, социальных, экономических и организационных, а также в группах автономных технических устройств.

Коллективная обработка информации и ее использование социальными системами, состоящими из людей, включают динамику пешеходных и автомобильных потоков [2, 3], экономическую деятельность, биржевую игру, взаимодействие организационных систем (ОС), боевые действия армейских подразделений, участие политических партий в избирательной кампании и многие другие процессы [4–6]. В настоящем обзоре рассмотрены основные известные на сегодня виды РИ в системах взаимосвязанных агентов, включая биологические, технические, социальные и организационные. В его первой части [7] обсуждались простейшие формы РИ, не включающие осознанной обработки информации индивидами: роевой интеллект общественных насекомых [8], стай птиц и рыб [9], групп взаимосвязанных роботов [4, 10]. Также были кратко рассмотрены особенности восприятия и обработки информации в «протоинтеллектуальных» схемах автоматического управления [11,12],

наиболее распространенные реализации ИИ (искусственные нейронные сети [13], «логический» интеллект [14] и некоторые методы имитации роевого интеллекта в расчетных компьютерных *алгоритмах, подсказанных Природой* [15]). Материал первой части обзора показывает, что РИ мультиагентных систем не сводится к стандартным схемам индивидуального или коллективного принятия решений либо иерархического или сетевого управления: он представляет собой самостоятельный и недостаточно изученный аспект кооперативной динамики [16], существенно использующий элементы хаотического поведения агентов.

Во второй части обзора будут рассмотрены некоторые формы коллективного интеллекта мультиагентных социальных систем (МСС), состоящих из людей. В отличие от более простых видов РИ, составляющие единицы в таких системах способны к глубокой переработке информации и творческой деятельности, что отражает формальное описание их динамики методами теории игр. Другой особенностью этих систем является тесное взаимодействие индивидуальных и коллективных форм интеллекта, в последние десятилетия в возрастающей степени включающее ИИ. Рассмотренный материал позволяет предложить общую классификацию всех известных форм интеллекта и указывает путь к его содержательному математическому описанию.

1. КОЛЛЕКТИВНЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ В ЧЕЛОВЕЧЕСКИХ СООБЩЕСТВАХ

1.1. «Разум толпы»

Роевому интеллекту биологических особей в человеческом обществе соответствует *разум толпы* (*crowd wisdom*), или РИ бесструктурного сообщества людей. Социологи и философы XIX–XX вв. (Г. Лебон [17], Х. Ортега-и-Гассет [18] и др.) в первую очередь отмечали редукцию сознания индивидуума в человеческой массе, примитивность и манипулируемость коллективного поведения толпы. В XXI в., вслед за опередившим современность на столетие социологическим исследованием Ф. Гальтона¹ [19], интерес научного сообщества

¹ В работе [19], подробно цитируемой в книге [6], обсуждалось распределение оценок 787 респондентами убойного веса быка на сельскохозяйственной выставке в Плимуте. Вознаграждение за точные оценки (требовавшие специальных знаний) выдавалось из денег, вырученных за продажу опросных карточек по 6 пенни за штуку. Медиана оценок (1 207 фунтов) превышала фактический убойный вес животного (1 198 фунтов) лишь на 0,8 %. Недавние масштабные интернет-опросы, проведенные исследователями из Стэнфордского университе-

привлекли способность «человеческих» МСС обрабатывать внешнюю информацию и механизмы кооперативных действий на ее основе.

В отличие от осознанной выработки мнений в группах (см. далее), «разум толпы» проявляется как стихийный процесс, который может не затрагивать когнитивных функций индивидуумов. Так, большая толпа «обтекает» препятствие, невидимое для большинства движущихся в ней людей (рис. 1). Механизм движения в толпе пешеходов «следовать за соседями и избегать столкновений» един для сообществ биологических особей и формаций беспилотных аппаратов [10]. Проявления РИ в движении пешеходных потоков рассмотрены в ряде работ [2, 4, 16]; их систематический анализ выполнен Д. Хелбингом и соавторами [21]. Синтез социологических исследований и математического моделирования осуществляется в области *управления толпой* (*crowd control*) с многочисленными задачами как в обеспечении безопасности массовых мероприятий (см. [22,23]), так и в подавлении манипулирования такими мероприятиями [24].

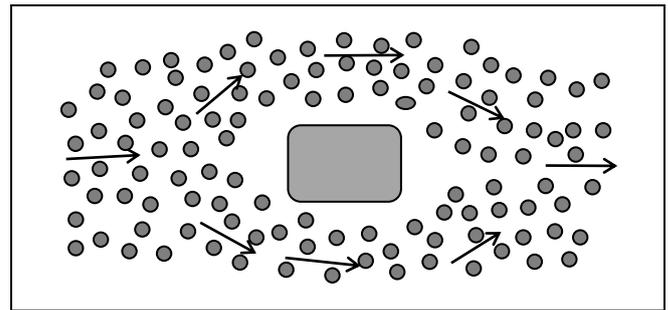


Рис. 1. «Обтекание» препятствия движущейся толпой

Аналогии с роевым интеллектом в бесструктурных сообществах людей распространяются на экономические отношения, включая знаменитую «невидимую руку рынка» и биржу, где стремление агентов к максимуму прибыли преобразуется в коллективную оценку стоимости активов. Весьма политизированный тезис о рынке как наилучшем механизме обработки экономической информации широко представлен в учебниках неоклассической экономики [25]. Проявления «разума биржи» обсуждаются в книге [6], хотя убедительных примеров в ней, по нашему мнению, не приводится. Постулируемая эффективность РИ участников торгов

та (2 тыс. участников, 1 000 вопросов в 50 различных областях знания, около 500 тыс. ответов) [20] подтвердили как более высокую эффективность «усредненного» интеллекта по сравнению с большинством индивидуальных респондентов, так и сильное влияние коллективного мнения (в тех случаях, когда оно сообщалось участникам на промежуточном этапе эксперимента), *ухудшающее* конечный результат.



используется биржами прогнозов, где предсказания политических событий могут продаваться и покупаться вплоть до их наступления аналогично фьючерсным контрактам; качество прогноза, по предположению, отражает его цена [26]. Поскольку объективные модели формирования цен на бирже в настоящее время неизвестны, биржевые прогнозы, ставшие в последние годы массовыми, могут использоваться для манипулирования общественным мнением.

Обмен информацией в сети Интернет в настоящее время часто рассматривают как одну из реализаций распределенного интеллекта [27]. Простой и убедительный пример «краудсорсинга» с включением РИ пользователей сети в анализ больших массивов данных дает ранжирование ссылок на сайты всемирной паутины, выдаваемых поисковыми программами по запросам, в порядке убывания числа уже состоявшихся обращений к этим сайтам. Данную схему, впервые реализованную поисковой системой Google PageRank в 1998 г., в настоящее время используют все основные средства поиска в Интернете. Прямой сетевой аналог маркировки муравьиных тропинок феромоном действует очень эффективно: перечень найденных ресурсов, который может содержать сотни и тысячи позиций, обычно возглавляют наиболее релевантные и интересные источники. Процессы в сетевых структурах нередко обсуждаются в терминах роевого интеллекта [28].

1.2. Динамика мнений в группах

Задачи оптимального функционирования МСС в человеческом обществе, где важную роль играют коммуникации и осознанные действия, на первый взгляд далеки от динамики косяка рыб или жизни пчелиного улья. Тем не менее, в них также проявляются общие принципы функционирования РИ: связи между элементами системы, передача информации и стремление системы к объективной цели, которая может не совпадать с целями элементов (примеры – сокращение персонала в организации, военные действия и многое другое). Объекты, «исчисляемые» в математических моделях таких систем – планы, мнения, стратегии – сами являются продуктами как индивидуальной, так и коллективной умственной деятельности: например, планирование уличного движения с учетом прогноза погоды. Общие методы решения задач такого уровня сложности до сих пор не вполне разработаны, можно обсуждать лишь наиболее распространенные частные схемы и эвристики.

Простейшей «молекулярной» формой МСС в человеческих сообществах является *малая группа*,

где все индивидуумы (агенты) осведомлены обо всех других членах группы, но различаются по силе и направленности взаимодействий, или *влиятельный*: клуб филателистов, совет директоров предприятия, армейский взвод и т. д. Взаимное влияние в малой группе, которым определяется ее динамика, отражают дуги взвешенного ориентированного графа, вершины которого соответствуют агентам [29]. Этот подход позволяет формализовать вклады индивидуумов в коллективную динамику группы, даже если их действия вариативны и точно не известны. Бесструктурную группу, где каждый агент одинаково взаимодействует со всеми остальными, представляет полный граф.

Обмен мнениями и выработка единой позиции составляют главное содержание деятельности экспертных советов; в том или ином виде они присутствуют в работе большинства органов управления. Моделирование различных аспектов этого процесса включает динамику установления единого мнения (консенсуса) и оценку степени влияния участников группы на вырабатываемое решение. При этом общеизвестная способность группы предложить новое нестандартное решение известной проблемы либо найти адекватный ответ на непредвиденные изменения обстановки крайне трудно поддается формализации и в моделях обычно не воспроизводится.

Математической основой выработки консенсуса часто служит модель де Гроота [30], в которой взаимное влияние агентов отражает стохастическая матрица влияний $W = \|w_{ij}\|$ с неотрицательными элементами

$$\left(\sum_{j=1}^n w_{ij} = 1 \right).$$

Недиагональным элементам матрицы W отвечает влияние агентов ($i \rightarrow j$ при $w_{ij} > 0$), диагональным – «самовлияние», т. е. устойчивость позиции агента. Вектор мнений n агентов в момент времени t $\mathbf{x}(t) = (x_1^{(t)}, x_2^{(t)}, \dots, x_n^{(t)})$ в следующий момент дискретного времени $t + 1$ определяется итерационной процедурой

$$\mathbf{x}(t+1) = W\mathbf{x}(t). \quad (1)$$

Если в графе взаимного влияния агентов есть подграф-дерево, все вершины которого достижимы из единственной вершины-корня (т. е. имеется агент, прямо или опосредованно влияющий на мнения всех других агентов), последовательные векторы мнений в формуле (1) сходятся к консенсусу \mathbf{x}^* [31] – такому вектору, что

$$W\mathbf{x}^* = \mathbf{x}^*.$$

Вектор консенсуса рассчитывается как собственный вектор матрицы W , отвечающий собственному значению $\lambda = 1$.

Применение модели де Гроота к прогнозированию вклада реальных лиц в выработку решений группы (руководства фирмы-конкурента, коллегии военного министерства вероятного противника и т. д.) предполагает определение элементов матрицы W по экспертным оценкам [29]. В разреженных матрицах влияний многие элементы (включая такие, для которых не имеется оценок) принимаются равными нулю, что дополнительно усложняет расчеты.

Модель де Гроота за последние десятилетия развивалась в тысячах публикаций (см. работу [31]). Одна из упрощенных процедур поиска консенсуса основана на эвристическом алгоритме условного доверия (*bounded confidence*), который воспроизводит сближение позиций сторон в ходе обсуждения [32]. В этом алгоритме мнениям агентов отвечает непрерывный параметр $x_i \in [0, 1]$. Пара агентов в соседних вершинах графа, отражающего структуру взаимодействий в группе, сближает свои позиции (x_i, x_j) , если разница между ними не превышает заданного порога доверия

$$\Delta x_{ij} = |x_i - x_j| < \delta.$$

В этом случае на каждом последующем шаге моделирования при $x_i > x_j$

$$x_i(t+1) = x_i(t) - \mu \Delta x_{ij},$$

$$x_j(t+1) = x_j(t) + \mu \Delta x_{ij},$$

где $\mu \in [0, 1]$ – параметр сходимости. При $|x_i - x_j| > \delta$ мнения агентов не изменяются. Это может приводить к поляризации мнений с разделением группы на фракции (рис. 2).

Алгоритм условного доверия с коэффициентами, отражающими разные веса мнений (например, министра и его заместителей) позволяет определить вклады агентов в общую позицию, но он также критически зависит от адекватности экспертных оценок и от параметров модели. К настоящему времени предложены разнообразные эмпирические схемы взаимного влияния, которые, в том числе, используются в анализе формирования и распространения мнений в социальных сетях (см. работы [33, 34], третью часть обзора [22] и обзорную главу [31] в книге [12]). Практические методы достижения консенсуса обсуждаются в научной и учебной литературе [35, 36], включая работы, явно направленные на манипулирование общественным мнением по вопросам «антропогенного глобального потепления» [37].

Схемы взаимного влияния при выработке консенсуса в группе с изначально заданным множе-

ством мнений не предусматривают возможности принципиально нового решения, т. е. не воспроизводят одно из ключевых свойств РИ, которое для групп и других относительно регламентированных систем, состоящих из людей, чаще называется *коллективным интеллектом*. В то же время в компьютерных системах поддержки принятия решений (СППР), разработанных для коллективного поиска неизвестных решений задачи, включая *мозговой штурм* [38, 39], применяются практические рецепты группового создания новой информации, аналогичные изобретательским эвристикам [40]: «расшатывание» модифицируемой модели, поощрение случайных ассоциаций и активное высказывание любых идей, которые становятся общим знанием (см. *blackboard* в «пчелином» алгоритме, рассмотренном в 1 части обзора [7, 41]). Подчеркнем, что успешное нестандартное решение проблемы группой не сводится к «озарению» одного из участников дискуссии: новая идея должна быть одобрена (и обычно скорректирована) другими участниками под руководством модераторов. Таким образом, мозговому штурму соответствует процесс коллективного творчества, до настоящего времени не формализованный в математических моделях.

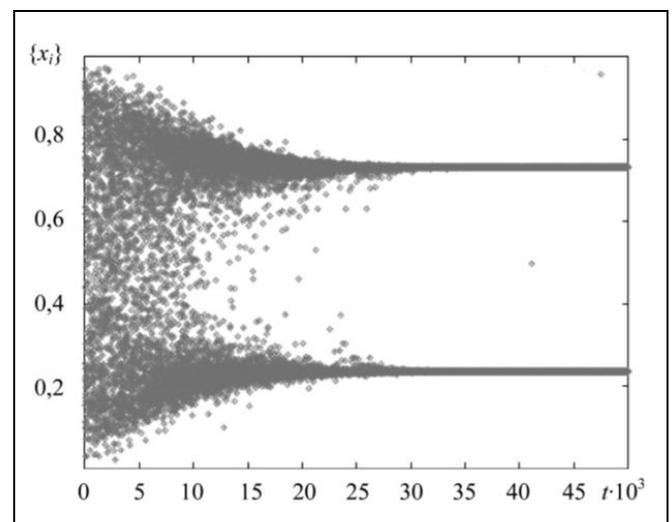


Рис. 2. Разделение бесструктурной группы агентов по непрерывному параметру мнения $x \in [0, 1]$ в модели условного доверия на фракции $x = 0,25$ и $x = 0,75$ при пороге согласия $\delta = 0,2$ [32]

При стохастических возмущениях «состояний ума» индивидуумов, участвующих в мозговом штурме (либо, например, в профессиональном научном семинаре) неизбежно возникают ошибочные предположения и иная «шумовая» информация – но именно этот процесс способствует воз-

никновению инсайта у участников обсуждения. Его результаты закрепляются коллективом по механизму, аналогичному воздействию временных лидеров на перемещение птичьей стаи (см. рис. 6 в первой части обзора [7]): перспективное предположение обсуждается, критикуется и модифицируется другими участниками дискуссии. Еще одной характерной чертой мозгового штурма является увеличение «библиотеки знаний» благодаря разным областям компетенции участников² (аналогичное расширению сферы обзора у косяка рыб [7]).

Проверка возникших идей в общей дискуссии и их закрепление в индивидуальном сознании каждого участника соответствует созданию новой информации эмерджентным коллективным интеллектом группы. Другой реализацией этого подхода служит *сетевая экспертиза*, также способная выработать нестандартные решения [42]. Явные параллели этого процесса с проявлениями роевого интеллекта в более простых биологических сообществах (см. первую часть обзора [7]) отражают единый механизм реализации группового РИ, превосходящего индивидуальные возможности участников группы.

Аналогии «креативной» интеллектуальной деятельности групп с роевым интеллектом, несмотря на принципиальную разницу когнитивных способностей человека и стайных животных, неоднократно отмечались в литературе [43]. Тем не менее, в ее формальных моделях «придумывание нового» обычно постулируется как эмпирически наблюдаемый эффект. Обзор методологий творческой комплексной деятельности с подробным обсуждением математических моделей разработки, освоения и применения новых технологий представлен в книге [44].

1.3. РИ организационных систем

Переход от роевого интеллекта бесструктурных сообществ к коллективному интеллекту групп, где взаимное влияние упорядочено³, сопровождается повышением точности и глубины выработанных предложений. Еще более упорядоченные *организационные системы* (ОС) по эффективности рутинной обработки информации сравнимы с инди-

² Еще раз подчеркнем, что термины *знания* и *компетенции* используются здесь в их «наивном», интуитивно понятном бытовом значении.

³ Компьютерные средства поддержки мозгового штурма или, например, научного семинара в онлайн-формате прежде всего структурируют группу участников и упорядочивают процесс обсуждения.

видуальным человеческим интеллектом, отчего их часто рассматривают как «бюрократическую машину» под тем или иным персональным руководством. Подобно объяснению новых результатов дискуссии индивидуальным «озарением» одного из участников, это представление не вполне соответствует действительности. Так, объем информации в годовом отчете, составленном коллективом предприятия, выходит далеко за пределы области знаний и интересов каждого из его соавторов, адресован нескольким разным группам специалистов (технических, финансовых, правовых и др.) и лишь корректируется руководством ОС (далее – Центром). Информация затем коллективно обрабатывается вышестоящей организацией и приводит к организационным воздействиям – например, к изменению годового финансирования в ту или иную сторону. Таким образом, РИ разнообразных ОС устанавливают прямой диалог, в котором индивидуальный интеллект их элементов играет скорее подчиненную роль.

В отличие от группы, графы влияния в которой могут быть произвольными, организационные системы обладают жесткой, как правило иерархической архитектурой (рис. 3) и управляются из единого центра, которым может быть как индивидуум, так и группа (например, совет директоров). Управляющие воздействия (на рис. 3 красные сплошные стрелки) распространяются в системе сверху вниз на следующие уровни иерархии вплоть до непосредственных исполнителей; в обратном направлении передается рабочая информация (синие пунктирные стрелки). По наличию иерархии ОС напоминает перевернутую искусственную нейронную сеть. Это сходство усиливается возможностью повышения связности узлов каждого ее «слоя» в форме опосредованного влияния участников системы на любые подразделения через информацию, передаваемую центру.

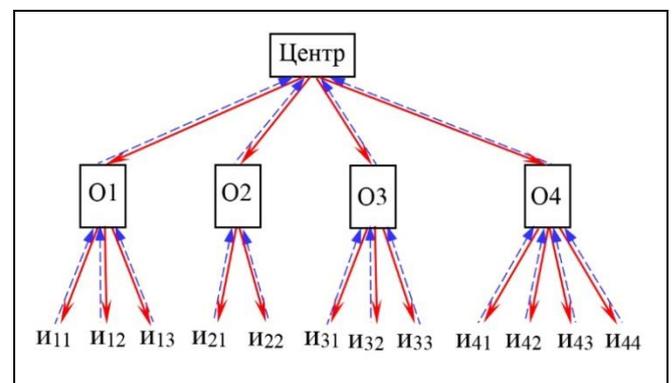


Рис. 3. Условная схема организационной системы: «О» – подразделения (отделы), «и» – исполнители

Если узлы ИНС лишь усиливают или ослабляют сигналы предыдущего слоя, то индивидуумы в ОС способны к глубокой переработке информации и к творческой интеллектуальной деятельности. Их функционирование в системе, помимо ее структуры, формализовано должностными инструкциями, выступающими в виде аналогов активационных функций-«фильтров» в ИНС. Отметим, что коллективные решения (в форме распоряжений Центра после получения им рабочей информации) обычно принимаются в нерутинной, постоянно изменяющейся обстановке. Деятельность ОС, хорошо известная по повседневной реальности, безусловно, включает отражения обстановки (отчеты), свертывание информации (интегральные показатели), целеполагание, обучаемость и адаптивность, а также выработку новых знаний (схемы выполнения планов, модернизация, реакция на чрезвычайные обстоятельства и т. д.) – т. е. все перечисленные выше признаки интеллекта. Обработка информации и ее использование в динамике ОС свидетельствует о наличии РИ у этого вида мультиагентных систем, однако в современной литературе еще нет его общепринятой теории.

Формальное описание функционирования ОС обычно построено на основе *теории игр*. В нем рассматривается взаимодействие, как правило, абсолютно рациональных [45] агентов (исключением являются модели ограниченной рациональности [46]), в котором выигрыш каждого в общем случае зависит от действий/стратегий всех агентов. Основная задача теории игр – предсказать результат взаимодействия агентов в виде равновесия их игры: устойчивого в том или ином смысле вектора их действий/стратегий. Таким образом, в теории игр агенты, с одной стороны, по определению интеллектуальны, а с другой – «зажаты» правилами игры (требованиями рационального поведения) в гораздо более жесткие рамки, чем это имеет место в реальных мультиагентных системах.

Плодотворным направлением данной области является, в частности, *теория активных систем* (ТАС) – раздел теории управления ОС, на динамику которых влияет интеллектуальное поведение (*активность*) участников системы [47]. В рамках ТАС разработан ряд методов и механизмов управления системами, включающих активные элементы с собственными целевыми функциями – поскольку такие элементы в своих интересах могут ухудшать функционирование системы (например, искажая передаваемую информацию). Для моделей активных систем разработаны неманипулируемые механизмы управления, распределения ресурсов, стимулирования и других видов деятельности. В частности, процедура *открытого управления* мак-

симизирует целевую функцию центра на множестве планов, отвечающих максимумам целевых функций «активных» агентов [47, 48]. Близкими задачами занимаются такие зарубежные направления теории игр, как теория контрактов и дизайн механизмов (англ. *Mechanism Design*, MD) – см. сравнительный обзор результатов ТАС и MD в работе [49].

В описании ОС также используются иерархические [50] и рефлексивные игры [51]. В *иерархической игре* Γ_i , отличающейся от игры в нормальной форме Γ_0 (где все агенты выбирают стратегии однократно, одновременно и независимо), управляющий центр выбирает стратегию x_1 первым (игра Γ_1) либо сообщает второму, «подчиненному» игроку (игрокам) свой план по выбору стратегии в ответ на выбор стратегии вторым игроком (Γ_2) и т. д. по возрастающей цепи $x_j = f(x_i(x_j(x'_i)...))$, где x_2 – стратегия («ход») второго игрока, и ходы игроков x'_j, x''_j, x'''_j ($j = 1, 2$) на разных уровнях планирования в функции f могут быть разными⁴. Многоуровневой структурой также обладают *рефлексивные игры* [51, 52] с частичной информированностью агентов о наборах стратегий противников и их информированности о стратегиях самого агента (в классических играх стратегии всех игроков являются общим знанием). В представлении рефлексивной игры графом к вершинам $\{x_i\}$, выражающим стратегии агентов, добавляются вершины «фантомных» агентов $\{x_{ij}^{(n)}\}$, где x_{ij} – стратегия j -го агента в представлении i -го агента, n – уровень (ранг) рефлексии. Сравнительные уровни интеллекта агентов в этом подходе выражаются числом доступных им рангов рефлексии. Добавление вершин в структуру МСС, очевидно, усложняет описание игры и затрудняет поиск равновесия на его основе.

В ОС более сложной структуры учет взаимодействий между агентами одного уровня приводит к «вложенным» играм с конкуренцией исполнителей и независимых центров (в этом случае описываемой играми Γ_0 , рис. 4). Подобным играм соответствуют активные системы с коалициями агентов, а также управление МСС конкурирующими центрами с многочисленными приложениями в задачах информационного противоборства и «управления толпой» [24, 33]. Методы теории игр в управлении ОС подробно рассмотрены в книге [53].

⁴ Добавление петель обратной связи, усложняющее функцию f , ограничено *теоремой Ю.Б. Гермейера*, согласно которой максимальный гарантированный выигрыш центра в играх Γ_m с четным и нечетным числом m не превышает выигрыша в играх Γ_2 и Γ_3 соответственно (см. работы [50, 52]).

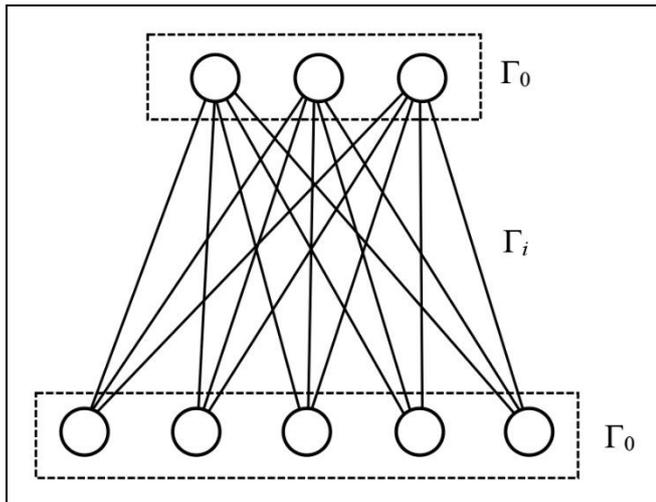


Рис. 4. «Вложенная» структура игры $\Gamma_0(\Gamma_i(\Gamma_0))$
(см. работу [52])

Для объективного мониторинга результатов деятельности активных систем, требуемого при выработке планов и необходимых управляющих воздействий, разработаны механизмы многокритериального комплексного оценивания [54]. Этот способ концентрирования информации в иерархических ОС по своей функции близок к процедурам обучения сверточных ИНС. Аналогии обработки информации в нейронных сетях и в иерархических организационных системах обсуждаются в работе [55].

Формализм теории игр позволяет анализировать и прогнозировать действия «интеллектуальных» агентов, а также предсказывать их результаты (равновесия), однако множество возможных действий должно быть фиксировано в условиях задачи. В теоретико-игровом описании ОС, как и в формальных алгоритмах выработки мнения в группе, за пределами моделей остаются эмерджентные события, т. е. принципиальные изменения стратегий – такие, как решение о банкротстве, выработка антикризисной программы и т. д. Эмпирически хорошо известное генерирование нового знания системой взаимосвязанных индивидуумов разительно отличается от моделей консенсуса как выбора лучшей индивидуальной программы действий либо взвешенного среднего из нескольких наперед заданных программ.

Настроения и моральный дух в реальных коллективах и группах в некоторых социологических моделях учитываются введением стилизованных «гуманитарных» переменных: уровня доверия, взаимопомощи и т. д. [29]. Косвенно отражая наличие РИ в ОС, этот подход также не воспроизводит механизмы его функционирования, поскольку

результаты коллективной обработки информации оказываются в нем заранее предписанными.

Аналогии с этой ситуацией можно найти в исследованиях причин солидарного поведения в МСС, состоящих из биологических, т. е. изначально эгоистичных особей [56, 57]. Теоретико-игровые модели подтверждают преимущества сообществ с агентами-альтруистами, равновесная доля которых зависит от внешних условий [58], однако механизм возникновения таких агентов ими не воспроизводится: альтруизм приходится постулировать [56]. Таким образом, методы теории игр позволяют описывать проявления РИ в ОС лишь феноменологически. В то же время возникновение альтруизма в «интеллектуальной» МСС объясняется на качественном уровне объективной целью самосохранения системы и изменчивостью поведения агентов как полезный признак, закрепляемый биологической эволюцией или (и) обучением.

1.4. Эмерджентный интеллект в системах управления ресурсами

Положение между стандартными ОС, обычно включающими от нескольких десятков до нескольких тысяч индивидуумов, и РИ макроскопических систем, который будет рассмотрен в следующем подразделе, занимает эмерджентный интеллект (ЕИ) – особая форма ИИ в транспортных, логистических, экономических и комбинированных системах управления предприятиями городского либо отраслевого масштаба (см. работу [59] и др. книги из этой серии, а также работу [60]). Признаком интеллекта таких систем считается способность автоматически распределять ограниченные ресурсы в изменяющейся обстановке без прямого вмешательства оператора. Количество варьируемых параметров в подобных задачах ставит жесткое централизованное управление, если оно вообще возможно, в критическую зависимость от компьютерных мощностей и осложняет коррекцию случайных возмущений в реальном времени из-за поломок, отказов, погодных условий и т. д.

Альтернативой прямому централизованному управлению и оптимизации служат математические модели гибких систем с обменом информацией между агентами, играющими роль поставщиков ресурсов либо услуг, и агентами-потребителями. Предложенная в 1990-е гг. модель BDI (*belief-desire-intentions*, т. е. «представления – желание – намерения»), в рамках которой агенты изначально интеллектуальны, а их взаимодействия заданы ма-

тематической логикой, столкнулась с трудностями формального определения базовых функций интеллекта и программной реализации [61]. Гораздо более перспективными оказались модели системы «ограниченно интеллектуальных» агентов с алгоритмически заданным стремлением к максимуму целевой функции (*виртуальных денег*), которые по известным значениям выигрышей и потерь устанавливают и переключают связи между множествами поставщиков и потребителей в переменной среде. На основе динамической *сети потребностей и возможностей* в таких моделях строится система *интеллектуального управления ресурсами* в реальном времени [62].

Эмерджентный интеллект мультиагентных моделей обмена ресурсами проявляет все основные признаки РИ: вариативность динамики взаимосвязанных агентов-поставщиков и агентов-потребителей, модельный обмен информацией между ними в форме перераспределения объемов предложения и спроса, индивидуальное стремление агентов к максимальным выигрышам и эволюция системы, которую представляет агент-диспетчер, к максимуму общей целевой функции. В характерной работе [63], содержащей краткий обзор состояния дел в этой области, обсуждается модель «умной экосистемы», которая минимизирует разность между запросами и наличными ресурсами при внешних возмущениях.

Метаэвристика «рыночных» агентов (см. NIMs в п. 3.3 первой части обзора [7]), которые стремятся к максимуму выигрыша, перераспределяясь между наиболее выгодными «заказами», успешно используется в широком спектре практических задач [62]. Число работ в области EI растет в последнее десятилетие [64], отражая в том числе популярность новой терминологии в традиционной задаче планирования и оперативного перепланирования ресурсов (см. работу [1]). Внедрение компьютерного ИИ в распределенный интеллект социальной системы проявляется здесь очень наглядно.

1.5. РИ «макроскопических» систем

К макроскопическим системам в физике относят совокупности взаимодействующих частиц, число которых $N \sim 10^{20} - 10^{24}$ может быть лишь на несколько порядков меньше числа Авогадро $6,02 \cdot 10^{23}$. Броуновские частицы, содержащие $10^{12} - 10^{15}$ атомно-молекулярных субъединиц, уже относятся к мезоскопическим системам. В этом смысле все социальные системы – микро- либо мезоскопические; этим хорошо объясняются масштабные

флуктуации их параметров. Однако в человеческом обществе к «макроскопическим», или *большим*, относятся МСС, содержащие от десятков тысяч и более индивидуальных агентов. Такие системы – страны, народы, отрасли экономики и т.д. – обычно имеют сложную плохо упорядоченную структуру и не вполне изученный механизм функционирования с сильным влиянием случайных факторов.

Феноменологическое описание человеческого общества, состоящего из коллективов как «собираемых личностей», и проекции физических законов на общественную среду были систематически представлены, по-видимому впервые, В.М. Бехтеревым в книге «Коллективная рефлексология» [65], намного опередившей свое время. Динамику больших социальных систем до сих пор по преимуществу анализируют на качественном уровне в гуманитарных науках.

Предельным по масштабу представителем макроскопического РИ можно считать гипотетический «всемирный интеллект» (*Global Brain*) пользователей компьютеров, объединенных в Интернет [66]. Однако декларируемые аналогии этой динамической сети с нейронными сетями мозга [67], заявленные лишь на вербальном уровне, выглядят сомнительно с точки зрения связи функций со структурой – для сети Интернет скорее хаотической без управляющего центра – и вряд ли указывают на ее когнитивные возможности (см. § 2). Координация составляющих элементов и рождение нового знания в макроскопических подсистемах современного мира (транспортной, научной, коммерческой), также на описательном уровне, обсуждаются в книге Дж. Шуровьески [6], представляющей популярное введение в проблематику РИ.

Способность больших систем к обработке информации и действиям на ее основе с общей точки зрения не вызывает сомнений, однако для РИ таких систем в литературе имеется лишь качественное описание. На этом уровне можно выделить его ключевые характеристики, согласующиеся с проявлениями других форм коллективного интеллекта:

- неупорядоченные взаимодействия коллективных акторов, среди которых преобладают конкурентные (экономика, научная и техническая среда, внутренняя политика) и антагонистические отношения (внешняя политика, войны);
- отсутствие признаков персонального управления – в частности, ослабление этических норм;
- стремление систем к равновесию;
- биоподобные жизненные циклы.



Одной из неожиданных особенностей РИ больших систем, состоящих из людей, нередко является низкий, по сравнению с индивидуальными человеческими нормами, уровень обработки информации и решения конкретных текущих задач. Как и редукция этики, это объясняется неличностным механизмом «кооперативного мышления» и слабо упорядоченной структурой межагентных взаимодействий. Понижение роли этических норм у крупномасштабного коллективного интеллекта вплоть до их временной отмены (войн) вызвано как размерами больших систем, на фоне которых относительная ценность единичного агента невелика, так и длительным, в масштабе столетий, временем их существования. Последним обстоятельством объясняется низкая эффективность «большого» интеллекта в решении сиюминутных задач: РИ больших систем решает проблемы в другом масштабе времени.

На аналогиях действий политических субъектов с поведением животных [68] основана большая область *биополитологии* [69]; параллели коллективных действий животных и людей также рассматриваются в *этологии человека* [70]. Другая характерная черта этого вида РИ – возможность ложного и нередко патологического массового целеполагания, обусловленная сильной зависимостью коллективной динамики от состояния индивидуумов (например, пьяная толпа). Вследствие этого можно говорить не только о коллективном интеллекте, но и о коллективной психике больших систем. Последний термин употребляется в социальной психологии [71] и лежит в основе *психоистории* [72]. Комбинация коллективного интеллекта и коллективной психики на уровне государства и составляющих его больших социальных подсистем обычно называется *идеологией*.

Противоборство участников конфликта объединяет их в единую «метасистему», также способную обрабатывать и использовать информацию. На стремлении таких систем к равновесию основано применение теории игр в политологии и военных науках [73–75]. Существование равновесных конфигураций даже при сильном антагонизме сторон иллюстрирует, в частности, график военных потерь СССР в Великой Отечественной войне (рис. 5). Если в 1942 г. весеннее наступление Красной Армии в условиях распутицы не достигло целей и сопровождалось большими потерями людей и техники (с пропорциональными потерями германской армии), то в неблагоприятные периоды весны 1943 г. и весны 1944 г. интенсивные боевые действия сторонами не велись (см. книгу [76]).



Рис. 5. Военные потери СССР с июня 1941 по май 1945 г., помесечно (по книге [76]): а – май 1942 г., б, в – стратегические паузы в апреле–июне 1943 и мае–июне 1944 г.

Таким образом, в РИ системы противоборствующих акторов вносят вклад все участники конфликта. На этом, в частности, основана теоретико-игровая интерпретация войн в рамках *теории торга* Т. Шеллинга [73].

Эволюция человечества как единой системы с конца XX в. обсуждается в гуманитарных науках в контексте *универсальной истории* Земли, включающей геофизические, экологические, технические и социальные факторы [77]. В терминах нашего обзора этот процесс прежде всего отражает динамику РИ систем мирового масштаба (государств, народов, цивилизаций [78]) в историческом масштабе времени со свойственной ей неравномерностью: взлетами, стагнацией и кризисами. На «универсальном» уровне особенно ярко проявляется неотделимость индивидуального интеллекта человека от образовательной и культурной среды – этот факт, тривиальный для носителей гуманитарного знания, до сих пор не вполне отражен в формальных моделях.

Несмотря на то, что РИ мировой экономико-политической системы с государствами в качестве агентов пока, к сожалению, не способен предотвращать кризисы и войны, его деятельность в мирное время является в основном созидательной. В этом смысле вспышки войн и революций с уничтожением людей, материальных ценностей и наименее жизнеспособных социальных институтов выступают в виде аналогов хаотического движения агентов в простейших МСС с роевым интеллектом. «Прерывистое» улучшение условий жизни населения Земли, численность которого в XX в. увеличилась почти в четыре раза несмотря на вой-

ны и эпидемии [79], основано на достижениях в области техники, экономики, медицины, социальной сферы и других аспектов реализации РИ. На описательном уровне очевидно, что научно-технический и социальный прогресс во все известные периоды истории является результатом развития коллективного интеллекта человечества и его больших подсистем. Это подчеркивает важность исследований РИ и поиска путей его адекватного математического описания.

Представление социума как «атомизированной» системы взаимодействующих индивидуумов, возникшее в XIX в., вывело эмерджентные проявления РИ за пределы социологических теорий – хотя религиозные, психологические и «организмистические» концепции общества продолжали существовать вплоть до первой половины XX в. [80⁵]. В современной литературе преобладает описание МСС как совокупности индивидуальных агентов с фиксированными наборами стратегий, что не предполагает возникновения новых качеств, порождаемых системой их динамических связей. Однако в математическом моделировании исторических процессов иногда используются «гуманитарные» переменные – такие, например, как моральный дух народа (*асабия*, или коллективная солидарность) в балансе ресурсов государства [81]. В этом косвенно проявляется объективная необходимость учитывать влияние коллективного интеллекта и коллективной психики на исторические процессы.

2. ФАКТОРЫ, ФОРМИРУЮЩИЕ РИ

Все виды РИ, рассмотренные в настоящем обзоре, сведены в табл. 1; эффективность генерирования новой информации оценена в последнем столбце на сугубо качественном уровне (знаком вопроса обозначены виды РИ, не являющиеся общепринятыми). Уже простейшие формы роевого интеллекта, возникшие у разных биологических видов для решения задач коллективного выживания, формируют гибкий ответ МСС на внешние незапрограммированные воздействия. Если приспособительные изменения организмов в ходе эволюции рассматривать как создание новой информации, необходимо признать существование весь-

ма эффективного «эволюционного РИ», что уже используется в расчетных *генетических* алгоритмах [15] – однако данное направление пока мало разработано. Также слабо развито формальное описание РИ наиболее крупномасштабных социальных систем: государств, народов и цивилизаций. Тем не менее, мировой технический и социальный прогресс, безусловно, отражает развитие именно этой формы «коллективного разума». В то же время достоверные проявления «общемирового» РИ, или *Global Brain*, построенного из пользователей глобальных компьютерных сетей, пока не известны. Учитывая хаотическую структуру сетей, его существование правильнее считать гипотезой.

Подводя итог краткому обзору известных типов распределенного интеллекта, отметим, что современные приложения РИ в области управления и планирования постоянно совершенствуются, не имеют четкой границы разделения с ИИ (EI, NIMs) и в сочетаниях с ИИ по своим возможностям в некоторых приложениях намного превосходят индивидуальный интеллект человека. Сам индивидуальный человеческий интеллект (HI), подобно модели полностью рационального и всезнающего *homo economicus* в неоклассических экономических дисциплинах и теории игр, правильнее считать абстракцией, отражающей ранние социологические представления об «атомизированном» обществе [80]. Обе эти модели в неявном виде включают воздействие коллективного интеллекта – соответственно социума в целом и экономических аспектов его деятельности. Неразрывная связь HI индивидуумов с коллективным интеллектом наглядно проявляется на всех его уровнях: обучения, формирования личности, использования накопленных социумом знаний, творчества и многих других.

Различные уровни любых носителей интеллекта (людей, живых организмов, разных видов социума, технических устройств и систем) в обобщенном виде показаны на рис. 6. Вложенные качества интеллектуальных агентов отражают в том числе историю развития их исследований. На последовательных уровнях интеллекта его фундаментальные качества, перечисленные в § 1 первой части обзора [7], могут наполняться разным содержанием – например, от цели, заданной извне роботу или ИНС, к неупорядоченным, но целенаправленным действиям роя, стремлению к цели животных либо «умных» логистических схем и, далее, к осознанному автономному целеполаганию и его адаптивному редактированию творческой личностью.

⁵ Многие из этих концепций возникли внутри расово-антропологических теорий и воззрений «социального дарвинизма», поэтому с середины XX в. их предали забвению вместе с содержащимися в них подходами к анализу РИ больших систем.

Виды и характерные признаки распределенного интеллекта

Виды РИ	Назначение	Структура	Уровень «шума»	Объем нового знания
Роевой интеллект (общественные насекомые, рыбы, птицы и др.)	Коллективное выживание	Слабая	Высокий	+
«Социальный» РИ общественных животных	Выживание, коллективное функционирование	Иерархия	Любой	++
Crowd wisdom человеческих сообществ (толпа, биржа, рынок, электорат)	Оптимизация коллективного функционирования	Слабая	Высокий	+
«Эволюционный РИ» биологических видов	Приспособление и выживание вида	Слабая	Высокий	?
Компьютерная имитация роевого интеллекта: агентные модели, NIMs	Воспроизведение динамики «природного» РИ, оптимизация вычислений	Фиксированная	Задается	?
ИИ искусственных социальных систем (формаций аппаратов и др.)	Оптимизация коллективного функционирования	Задается	Любой	?
РИ малых групп	Принятие решений	Слабая	Низкий	++
Комбинированные системы «человек – компьютер», программные средства «мозгового штурма»	Принятие решений, поиск новой информации, коллективное творчество	Фиксированная	Задается	++++
РИ организационных систем	Поддержка всех процессов функционирования социума	Иерархия	Низкий	+++
Emergent intelligence систем крупного масштаба (транспорт, логистика, городское хозяйство и др.)	Оптимизация хозяйственной деятельности, решение поставленных задач	Сложная иерархия	Средний	++
РИ в экономике, политике и военном деле	Оптимизация коллективного функционирования, решение поставленных задач	Иерархия; сложная иерархия	Любой	+++
Большие системы уровня государства и выше (история, культура, цивилизации)	Выживание; технический и социальный прогресс	Сложная, слабо упорядочена	Переменный	++++
Гипотетический «всемирный интеллект» (Global Brain)	Оптимизация функционирования человечества как системы	Скорее неизвестна	Переменный	?

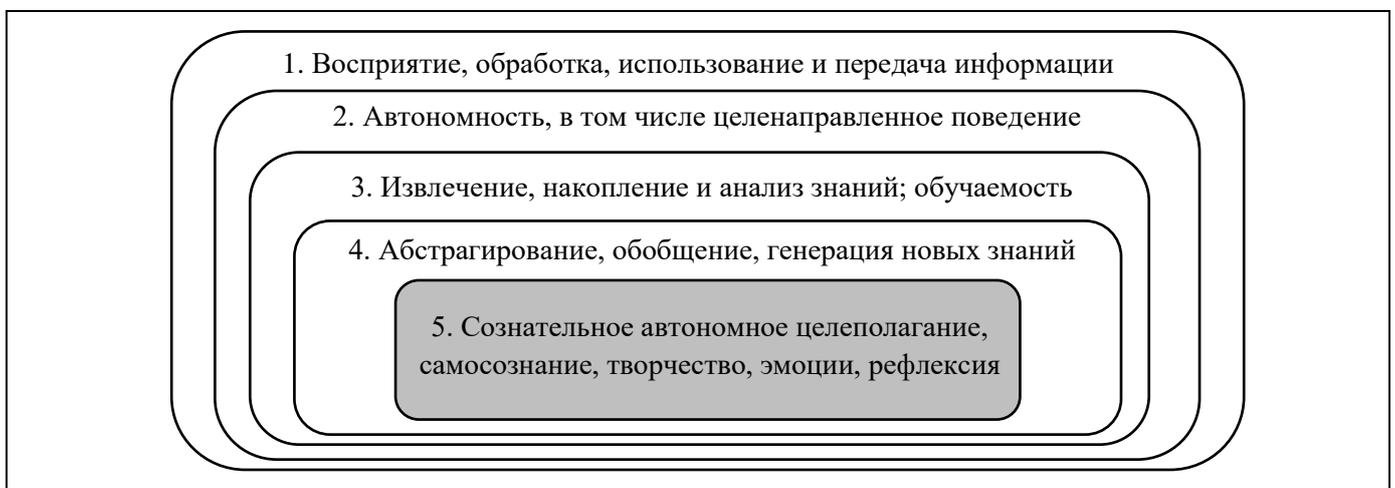


Рис. 6. Общие «уровни интеллектуальности» [82, 83]

Внешнему контуру диаграммы на рис. 6 соответствуют возможности технических устройств и САУ – в том числе таких, которые за пределами специальных прикладных дисциплин не считаются интеллектуальными. На остальные уровни распространяются разные типы интеллекта, включая НИ или РИ в комбинации с ИИ. В области искусственного интеллекта на сегодняшний день преобладают системы третьего уровня, сейчас массового и интенсивно развивающегося. Некоторые успехи есть на четвертом уровне, но пятый пока является мечтой – т. е. внутренняя затененная область еще остается суверенной территорией человеческого интеллекта.

В области РИ к интеллектуальным иногда относят системы уже второго уровня, демонстрирующие эмерджентные (сверхаддитивные) свойства в результате взаимодействий множества агентов: расширение углового обзора косяка рыб, муравьиные тропинки, «мудрость толпы» как усреднение оценок и др. К третьему уровню здесь можно отнести мультиагентные системы распределенного решения задач (ЕИ, рутинные действия ОС), которые не только повышают эффективность обработки информации благодаря взаимодействию агентов, но и способны извлекать новые знания и обучаться. Наконец, коллективный человеческий интеллект как высокоразвитая форма РИ при относительно регламентированных взаимодействиях и «дозированных» нарушениях структуры (многие организационные системы, в том числе сетевая экспертиза, мозговой штурм и др.), непосредственно использует творческие способности человека (пятый уровень).

Характерной чертой распределенного интеллекта в человеческом социуме является целенаправленное усиление всех качеств, составляющих «ядро» интеллектуальной деятельности людей (центральный блок⁶ на рис. 6). На данном уровне индивидуальный и коллективный интеллект неразделимы (образование, организация творческой деятельности, культура, цивилизация) и должны рассматриваться в едином контексте. По этим причинам классификация и формализация всех известных видов РИ сохраняет большую актуальность. В структурированных подсистемах социума распределенный интеллект реализуется как эмерджентное качество «ансамбля» индивидуальных интеллектов – в последние десятилетия

также с использованием ИИ. Отсюда следует необходимость совместно анализировать все виды интеллекта с единых позиций.

Перечислим факторы, которые наиболее очевидно коррелируют с наличием РИ у социальных систем (включая искусственные системы) и с его эффективностью. В той или иной степени эти факторы проявляются в коллективной динамике всех рассмотренных нами МСС; эффективность РИ определяется их совокупным действием. (В то же время наличие лидера, составление планов, достижение консенсуса и ряд других особенностей динамики «человеческих» ОС не имеют столь же общего характера и сводятся к некоторым определенным комбинациям ключевых компонентов РИ.) В этом смысле можно надеяться, что данный список избыточен и достаточно полон:

1. Мультиагентный характер системы, наличие связей между автономными агентами.
2. Плотность и интенсивность межагентных связей.
3. Индивидуальные когнитивные возможности агентов.
4. Структура системы и упорядоченная динамика агентов.
5. Флуктуации структуры и динамики системы, воздействие внешней среды.
6. Отражение, свертывание и запись информации.

Перечисленные признаки характерны для любых «умных» систем, включая индивидуальный интеллект (где, как не раз отмечалось в литературе по ИИ и РИ в XX в., в роли взаимосвязанных элементов выступают нейроны мозга), ИНС и NIMs. Фундаментальным проявлением интеллекта мультиагентной системы является «коллективная рациональность», не обязательно включающая индивидуальное осмысливание объективной цели. Совместное стремление к цели, не осознаваемой участниками процесса, характерно для всех достаточно больших и сложных систем, объективные потребности которых недоступны для понимания индивидуальных агентов – включая массовые политические и социальные события.

Наличие индивидуального интеллекта (п. 3), при всей его очевидности для МСС, состоящих из людей, не является обязательным условием: роевой РИ насекомых складывается из особей с низкими когнитивными возможностями. В разных сочетаниях со структурой и элементами стохастической динамики индивидуальный интеллект агентов может как размываться (уличная толпа), так и усиливаться в рамках поставленных задач (группы экспертов, действия экономических субъектов и др.).

⁶ Такие общие понятия, как *образование, культура, наука, цивилизация* и многие другие, фактически представляют собой метафоры, обозначающие разные проявления коллективного интеллекта больших систем.



Четвертый и пятый факторы, т. е. упорядоченная структура и ее нарушения, формально противоречат друг другу, однако они реализуются вместе в большом числе рассмотренных здесь «интеллектуальных» систем (пример – схемы мозгового штурма и других форм коллективной творческой деятельности [38, 43]). Наконец, средством свертывания информации (как необходимого условия обработки бесконечного объема данных) и ее записи (п. 6) служат динамические «образы» внешнего воздействия, воспринимаемые элементами МСС. Отпечатками внешних воздействий в разных системах могут быть «блоки» сознания [84], участки коры головного мозга [85], муравьиные тропинки (см. рис. 8, а, в в первой части обзора [7]), этические нормы в обществе [56, 57], комплексные оценки [54], а также механизмы управления ОС [47, 48] и многие другие сущности. Всеми этими факторами определяется механизм обработки и эффективного использования информации в разных видах МСС, т. е. в рассмотренных здесь разновидностях РИ.

Рациональность индивидуального поведения людей возрастает с сокращением возможностей выбора (переход улицы на зеленый свет, биржевая торговля с фиксированной ценой акций) и становится «ограниченной» при выборе из многих возможностей (попытка пересечь улицу на красный свет, торги при высокой волатильности цен). Рациональность коллективной динамики системы также увеличивается при ограничении набора возможных действий агентов и при наличии «библиотеки» стандартных реакций на внешние воздействия (*пожар в театре*⁷). Можно предположить, что за всеми многообразными проявлениями интеллекта – как индивидуального, так и распределенного – скрывается единый механизм восприятия внешних воздействий «умным» агентом, основанный на структурировании их признаков.

Модель «интеллектуального» восприятия и обработки информации, предложенная в работе [86], ставит в соответствие внешнему воздействию конечную комбинацию блоков (модулей), каждый из которых отражает определенную характеристику, или *качество*, объекта. «Отпечаток» воздействия в восприятии агента представляется взвешенной суммой

$$\xi_i = \sum_{j=1}^n w_j m_j^{(i)},$$

где $\{m_j^{(i)}\}$ – модули, формирующие образ ξ_i , $\{w_j \in [0, 1]\}$ – их весовые коэффициенты. Комбинация нескольких качеств задает образ объекта подобно слову в иероглифической письменности. Эта схема позволяет весьма экономно представить неограниченное число внешних воздействий небольшими ($n < 10$) комбинациями модулей при разумном размере библиотеки $N \sim 1000$ (отражающими технические ограничения человеческой памяти) и воспроизводит рождение новой информации как построение новой комбинации имеющихся модулей для не встречавшегося ранее объекта.

Модульная структура образа внешних воздействий естественно распространяется на проявления распределенного интеллекта мультиагентных социальных систем. В случае ОС функцию блоков в модульной интерпретации внешних воздействий выполняют служебные инструкции и нормативы. В роли «блочного» образа выступают действия персонала по инструкциям, корректировке образа в изменившихся условиях с заменой блоков соответствует поиск лучшей комбинации доступных действий, а запоминанию новой информации – дополнение и изменение инструкций. В «живых» МСС с более примитивными агентами также можно выделить модули, направляющие коллективную динамику и изменяющиеся при варьировании обстановки: танцы пчел в улье, тропинки муравьев, воспроизводимые режимы перемещения особей в стае и др. (см. первую часть обзора [7]).

Связь «глубины» коллективного интеллекта системы с упорядоченностью ее структуры и действий агентов иллюстрирует табл. 2. Строгая регламентация работы «идеальной комиссии» (левая колонка таблицы) является эвристикой, повышающей ее эффективность. В то же время полностью неформальная система, где сняты все ограничения (правая колонка), независимо от интеллектуального уровня ее участников, вряд ли может принять какое-либо общее решение. Неупорядоченные «человеческие» МСС или их части, структуру взаимодействий в которых можно представить полным графом, демонстрируют неспособность критически воспринимать внешние воздействия и обычно служат объектом манипулирования (уличная толпа [24], «информационные пузыри» в социальных сетях [33], основная часть электората в ходе избирательной кампании (см. [22] и др.). В то же время эффективная обработка информации

⁷ В этом хрестоматийном социологическом примере пожар в театре, несмотря на высокий культурно-образовательный уровень большинства зрителей, грозит возникновением паники и давки. Однако находящаяся в зале рота солдат с большой вероятностью выведет всех зрителей без потерь, выполняя приказы командиров.

Особенности функционирования некоторых модельных МСС

«Идеальная комиссия»	Политический митинг	«Коллективный идиот»
Общие знания по специальности	Общие намерения	Ничего общего
Целевой отбор участников по критерию квалификации	Случайный отбор участников по близости настроений	Свободный вход
Сильное управление (председатель с решающим голосом)	Слабое управление	Нет управления
Формализованный обмен информацией и мнениями, исключение эмоций	Неформальный обмен мнениями и эмоциями	Случайный обмен эмоциями
Количественное сравнение значимости мнений (голосование)	Декларации мнений (призывы)	Нет формулируемых мнений
Подчинение меньшинства большинству	Неподчинение меньшинства большинству	Нет большинства
Обязательность исполнения решений	Необязательность исполнения решений	Нет решений

в ИНС и ОС непосредственно определяется их жесткой структурой. Некоторые процессы коллективного принятия решений, составляющие ядро РИ в «человеческих» системах различного масштаба, были проанализированы в статье [87]; в публикации [88] приведены результаты их идентификации для онлайн-социальных сетей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Материал, рассмотренный в настоящем обзоре, позволяет утверждать, что проявления РИ на всех его известных уровнях обнаруживают общие черты, определяемые коллективной обработкой информации, не обязательно рефлексивной сознанием агентов. (В системах общественных насекомых, рыб и птиц, как и в природоподобных компьютерных метаэвристиках, говорить о сознании агентов не приходится – но информационное содержание массовых коллективных процессов в человеческом обществе обычно тоже не осознается их участниками.) Возможности РИ определяются интенсивностью и структурой взаимодействий между агентами, их когнитивными способностями, а также балансом степени упорядоченности системы и случайного «шума», который играет важную роль в оптимизации динамики системы. В ряде общеизвестных примеров (мозговой штурм, научная дискуссия, собрания в творческой среде и др.) «придумывание нового» стимулируется целенаправленным усилением «шума», который размывает стереотипы и повышает вероятность «озарения» (инсайта). Аналогии в проявлениях индивидуального, коллективного и искусственного интеллекта – с необходимой оговоркой об отсутствии

общепринятого определения этого феномена – указывают на перспективность анализа всех его известных форм с единых позиций.

Представленный выше анализ разных видов РИ в биологических, социальных и искусственных мультиагентных системах не только показывает однотипные формы его реализации, но и выявляет неполноту существующих формальных моделей, чем осложняется единая интерпретация данного явления. При обилии публикаций и направлений в области когнитивных наук в обсуждаемых ими аспектах интеллекта отсутствуют формальные алгоритмы «придумывания нового», т. е. создания ранее не существовавших знаний за пределами их логического вывода. Современные модели, позволяющие классифицировать этапы креативной деятельности [83], сталкиваются с необходимостью создавать математические образы объектов, не существующих внутри наличного множества знаний до исполнения некоторого творческого акта, а современная математика, по-видимому, пока не обладает развитым аппаратом для описания несуществующего. В то же время модульная модель восприятия позволяет обойти эту проблему, представляя новые образы как не использованные ранее комбинации уже известных агенту качеств внешних воздействий.

Все аспекты деятельности интеллекта в разной степени воспроизводятся в кооперативной динамике разнообразных мультиагентных систем, свидетельствуя о наличии РИ у таких систем. Обзор многочисленных форм РИ в биологических и человеческих сообществах демонстрирует как явные параллели динамики РИ с проявлениями индивидуального интеллекта, так и отсутствие эмер-



джентных эффектов рождения новой информации в его существующих теориях. Вместе с тем, такие эффекты воспроизводятся феноменологическими мультиагентными моделями, используются в современных вычислительных «природных» алгоритмах, непосредственно учитываются в СППР и других компьютерных средствах поддержки интеллектуальной деятельности людей. Задача единого формального моделирования как индивидуального, так и распределенного интеллекта представляется весьма актуальной.

Благодарности. Авторы выражают искреннюю признательность *д-ру техн. наук, проф. О.П. Кузнецову, канд. техн. наук А.В. Макаренко и д-ру техн. наук, проф. П.О. Скобелеву* за внимательное ознакомление с рукописью и ценные конструктивные замечания.

ЛИТЕРАТУРА

- Новиков Д.А., Кибернетика: навигатор. История кибернетики, современное состояние, перспективы развития. – М.: ЛЕНАНД, 2016. – 160 с. [Novikov, D.A. Kibernetika: navigator. Istoriya kibernetiki, sovremennoe sostoyanie, perspektivy razvitiya. – Moscow: LENAND, 2016. – 160 s. (In Russian)].
- Cavens, D., Gloor, C., Illenberger, J., et al. Distributed Intelligence in Pedestrian Simulations / In: Pedestrian and Evacuation Dynamics. Ed. by Waldau N., Gattermann P., Knoflacher H., Schreckenberg M. Berlin, Heidelberg: Springer, 2007. – P. 201–212.
- Fu, X., Gao, H., Cai, H., et al. How to Improve Urban Intelligent Traffic? A Case Study Using Traffic Signal Timing Optimization Model Based on Swarm Intelligence Algorithm // Sensors. – 2021. – Vol. 21. – Art. no. 2631.
- Корепанов В.О. Модели рефлексивного группового поведения и управления. – М: ИПУ РАН, 2011. – 127 с. [Korepanov, V.O. Modeli refleksivnogo gruppovogo povedeniya i upravleniya. – Moscow: ICS RAS, 2011. – 127 s. (In Russian)].
- Vásárhelyi, G., Virágh, C., Somorjai, G., et al. Optimized Flocking of Autonomous Drones in Confined Environments // Science Robotics. – 2018. – Vol. 3, no. 20. – Art. no. eaat3536.
- Шуровьески Дж. Мудрость толпы. Почему вместе мы умнее, чем поодиночке, и как коллективный разум формирует бизнес, экономику, общество и государство: Пер. с англ. – М.: ООО «И.Д. Вильямс», 2007. – 304 с. [Surowiecky, J. The Wisdom of Crowds. – New York: Anchor Books, 2005. – 336 p.]
- Словохотов Ю.Л., Новиков Д.А. Распределенный интеллект мультиагентных систем. Ч. 1. Основные характеристики и простейшие формы // Проблемы управления. – 2023. – № 5. – С. 3–22. [Slovokhotov, Yu.L. and Novikov, D.A. Distributed Intelligence of Multi-Agent Systems. Part I: Basic Features and Simple Forms // Control Sciences. – 2023. – No. 5. – P. 2–17.]
- Chittka, L., Rossi, N. Social Cognition in Insects. Trends in Cognitive Sciences. – 2022. – Vol. 26, no. 7. – P. 578–592.
- Couzin, I.D. Collective Cognition in Animal Groups // Trends in Cognitive Sciences. – 2009. – Vol. 13, iss. 1. – P. 36–43.
- Springer Handbook of Robotics, 2nd Ed. Ed. by Siciliano, B., Khatib, O. Berlin: Springer-Verlag, 2015. – 2227 p.
- Поляк Б.Т., Хлебников М.В., Рапопорт Л.Б. Математическая теория автоматического управления: учебное пособие. – М.: ЛЕНАНД, 2019. – 500 с. [Polak, B.T., Khlebnikov, M.V., Rapoport, L.B. Matematicheskaya teoriya avtomaticheskogo upravleniya: uchebnoye posobiye. – Moscow: LENAND, 2019. – 500 p. (In Russian)].
- Теория управления (дополнительные главы): Учебное пособие / Под ред. Д.А. Новикова. – М.: ЛЕНАНД, 2019. – 552 с. [Teoriya upravleniya (dopolnitel'nye glavy). Uchebnoye posobiye. Ed. by D.A. Novikov. – M.: LENAND, 2019. – 552 s. (In Russian)]
- Макаренко А.В. Глубокие нейронные сети: зарождение, становление, современное состояние // Проблемы управления – 2020. – № 2. – С. 3–19 [Makarenko, A.V. Deep Neural Networks: Origins, Development, Current Status // Control Sciences. – 2020. – No 2. – P. 3–19. (In Russian)].
- Тей А., Грибомон П., Луи Ж. и др. Логический подход к искусственному интеллекту: от классической логики к логическому программированию (пер. с франц.) – М.: Мир, 1990. – 432 с. [Thayse, A., Gribomont, P., Louis, G., et al. Approche logique de l'intelligence artificielle. Tome 1: De la logique classique a la programmation logique. – Paris: Bordas Editions, 1988. – 274 p. (In French)].
- Chakraborty, A, Kar, A.K. Swarm Intelligence: A Review of Algorithms / In: Nature-Inspired Computing and Optimization: Theory and Applications. Ed. by Patnaik, S., Yang, X-S., Nakamatsu, K. – Cham: Springer, 2017. – P. 475–494.
- Kennedy, J., Eberhart, R.C., Shi, Y. Swarm Intelligence. – Burlington: Morgan Kaufman Publishers, 2001.
- Лебон Г. Психология народов и масс (пер. с франц.). – М.: АСТ, 2019. – 384 с. [Le Bon, G. Psychologie des foules. Paris: Édition Félix Alcan, 1905, 9e edition. – 192 p. (In French)].
- Ортега-и-Гассет Х. Дегуманизация искусства. Бесхребетная Испания / Восстание масс. (сб., пер. с исп.). – М.: АСТ, 2008. – С. 19–172. [Ortega y Gasset, J. La rebelión de las masas. – Madrid: Revista de Occidente, 1930. – 309 p.]
- Galton, F. Vox Populi // Nature. – 1907. – Vol. 75. – P. 450–451.
- Simoiu, C., Sumanth, C., Mysore, A., Goel, S. A Large-Scale Study of the ‘Wisdom of Crowds’. – Stanford: Stanford University, 2019. – URL: <https://www.semanticscholar.org/paper/A-Large-Scale-Study-of-the-“Wisdom-of-Crowds”-Simoiu-Sumanth/23810e0888de1fa6583b35bed24f02b41a926062>.
- Helbing, D., Johansson, A. Pedestrian, Crowd and Evacuation Dynamics / In: Encyclopedia of Complexity and System Science. Ed. by Meyers, R. – New York: Springer, 2009. – P. 6476–6495.
- Словохотов Ю.Л. Физика и социофизика. Ч. 1–3. // Проблемы управления. – 2012. – № 1. – С. 2–20; № 2. – С. 2–31; № 3. – С. 2–34. [Slovokhotov, Y.L. Physics vs. Sociophysics. Parts 1–3 // Control Sciences. – 2012. – No. 1. – P. 2–20; – No. 2. – P. 2–31; No. 3, – P. 2–34. (In Russian)].
- Барабанов И.Н., Новиков Д.А. Динамические модели управления возбуждением толпы в непрерывном времени // Управление большими системами. – 2016. – Вып. 67. – С. 71–86. [Barabanov, I.N., Novikov, D.A. Continuous-Time Dynamic Models of Mob Excitation // Large-Scale Systems Control. – 2016. – No. 67. – P. 71–86. (In Russian)].
- Новиков Д.А. Модели информационного противоборства в управлении толпой // Проблемы управления. – 2015. – № 3. – С. 29–39. [Novikov, D.A. Models of Informational Confrontation in Mob Control // Control Sciences. – 2015. – No 3. – P. 29–39. (In Russian)].

25. *Wolf, R.D., Resnick, S.A.* Contending Economic Theories: Neoclassical, Keynesian, and Marxian. – Cambridge–London: MIT Press, 2012. – 425 p.
26. *Graefe, A.* Political markets / In: The SAGE Handbook of Electoral Behavior. Ed. by Arzheimer, K., Evans, J., Lewis-Beck, M.S. – New York: SAGE Publications, 2017. – 1102 p.
27. *Макафи Э. Бриньолфсон Э.* Машина, платформа, толпа. Наше цифровое будущее. – М: МИФ, 2019. – 320 с. [*McAfee, A., Brynjolfsson, E.* Machine, Platform, Crowd: Harnessing Our Digital Future. – New York: W.W. Norton & Company, 2017. – 416 p.]
28. *Becker, J., Brackbill, D., Centola, D.* Network Dynamics of Social Influence in the Wisdom of Crowds // Proc. Nat. Acad. Sci. – 2017. – Vol. 114, no. 3. – P. E5070–E5076.
29. *Михайлов А.П., Петров А.П.* Математические модели системы «человек–общество». – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2022. – 456 с. [*Mikhailov, A.P., Petrov, A.P.* Mathematical Modeling of the ‘Human–Society’ System. – Moscow: FIZMATLIT, 2022. – 456 p. (In Russian)].
30. *DeGroot, M.H.* Reaching a Consensus // J. Amer. Statist. Assoc. – 1974. – Vol. 69, no. 45. – P. 118–121.
31. *Чеботарев П.Ю.* Сетевые многоагентные системы / Теория управления (дополнительные главы): Учебное пособие / Под ред. Новикова Д.А. – М.: ЛЕНАНД, 2019. – С. 303–322. [*Chebotarev, P.Yu.* Multiagent Network Systems / In: Teoriya upravleniya (dopolnitel’nye glavy). Uchebnoya posobiye. Ed. by Novikov, D.A. – Moscow: LENAND, 2019. – P. 303–322. (In Russian)].
32. *Deffuant, G., Neau, D., Amblard, F., Weisbuch, G.* Mixing Beliefs among Interacting Agents // Adv. Complex Systems. – 2000. – Vol. 3, no. 4. – P. 87–98.
33. *Губанов Д.А., Новиков Д.А., Чхартишвили А.Г.* Социальные сети: модели информационного влияния, управления и противоборства. 3-е изд. – М.: МЦНМО, 2018. – 224 с. [*Gubanov, D.A., Novikov, D.A., Chkhartishvili, A.G.* Social Networks: Models of Informational Influence, Control and Contest. 3rd Ed. – Moscow: MTsNMO, 2018. – 224 p. (In Russian)].
34. *Kozitsin, I.V.* A General Framework to Link Theory and Empirics in Opinion Formation Models // Sci. Rep. – 2022. – Vol. 12, no. 5543. – P. 1–18.
35. *The Consensus Building Handbook.* Ed. by Susskind, L., McKernan, S., Thomas-Larmer, J. – London: Sage Publications, 1999. – 176 p.
36. *Hertzberg, M., Smith, R., Westphal, R., et al.,* A Consensus Handbook: Co-operative Decision-Making for Activists, Co-ops and Communities. – Lancaster: Seeds for Change Co-operative Ltd., 2016. – 226 p.
37. *Cook, J., van der Linden, S., Maibach, E.W., Lewandowsky, S.* The Consensus Handbook: Why the Scientific Consensus on Climate Change is Important. – 2018. – DOI: 10.13021/G8MM6P
38. *Wagner, C., Back, A.* Group Wisdom Support Systems: Aggregating the Insights of Many through Information Technology // Issues in Inform. Syst. – 2008. – Vol. 9, no. 2. – P. 343–350.
39. *Сидельников Ю.В.* Четырехэтапная мозговая атака // Проблемы управления. – 2014. – № 1. – С. 36–44. [*Sidelnikov, Yu.V.* Four-Stage Brainstorm // Control Sciences. – 2014. – No. 1. – P. 36–44. (In Russian)].
40. *Альтшуллер Г.С.* Найти идею. Введение в ТРИЗ – теорию решения изобретательских задач. 4-е изд. – М.: Альпина Паблишерз, 2011. – 400 с. [*Altshuler, G.S.* Najti ideyu. Vvedenie v TRIZ^ teoriyu resheniya izobretatel’skikh zadach. 4th Ed. – Moscow: Alpina Publishers, 2011. – 400 p. (In Russian)].
41. *МакКоннелл Дж.* Основы современных алгоритмов. – М.: Техносфера, 2004. – 368 с. [*McConnell, J.J.* Analysis of Algorithms: An Active Learning Approach. – Boston: Jones & Bartlett Publishers, 2001. – 297 p.]
42. *Губанов Д.А., Коргин Н.А., Новиков Д.А., Райков А.Н.* Сетевая экспертиза. – М.: Эгвес, 2011. – 166 с. [*Gubanov, D.A., Korgin, N.A., Novikov, D.A., Raikov, A.N.* Setevaya ekspertiza. – Moscow: Egves, 2011. – 166 p. (In Russian)].
43. *O’Bryan, L., Beier, M., Salas, E.* How Approaches to Animal Swarm Intelligence Can Improve the Study of Collective Intelligence in Human Teams // J. Intel. – 2020. – Vol. 8, no. 9. – P. 1–18.
44. *Белов М.В., Новиков Д.А.* Модели технологий. – М.: ЛЕНАНД, 2019. – 160 с. [*Belov, M.V., Novikov, D.A.* Models of Technologies. – Moscow: LENAND, 2019. – 160 p. (In Russian)].
45. *Myerson, R.B.* Game Theory: Analysis of Conflict. – Harvard University Press, 2013. – 584 p.
46. *Новиков Д.А.* Ограниченная рациональность и управление // Математическая теория игр и ее приложения. – 2022. – Т. 14, вып. 1. – С. 49–84. [*Novikov, D.A.* Bounded Rationality and Control // Matematicheskaya teoriya igr i ee prilozheniya. – 2022. – Vol. 14, no 1. – P. 49–84. (In Russian)].
47. *Бурков В.Н., Новиков Д.А.* Теория активных систем: состояние и перспективы. – М.: Синтег, 1999. – 128 с. [*Burkov, V.N., Novikov, D.A.* The theory of active systems: state and prospects. – Moscow: Sinteg, 1999. – 128 p. (In Russian)].
48. *Бурков В.Н., Новиков Д.А.* Теория активных систем (история развития и современное состояние) // Проблемы управления. – 2009. – № 3.1. – С. 29–35 [*Burkov, V.N., Novikov, D.A.* Active Systems Theory (History of Development and the Current State) // Control Sciences. – 2009. – No 3.1. – P. 29–35. (In Russian)].
49. *Бурков В.Н., Еналеев А.К., Коргин Н.А.* Согласованность и неманипулируемость механизмов организационного управления: текущее состояние проблемы, ретроспектива, перспективы развития теоретических исследований // Автоматика и телемеханика. – 2021. – № 7. – С. 5–37. [*Burkov, V.N., Enaleyev, A.K., Korgin, N.A.* Incentive Compatibility and Strategy-Proofness of Mechanisms of Organizational Behavior Control: Retrospective, State of the Art, and Prospects of Theoretical Research // Automation & Remote Control. – 2021. – Vol. 82, no 7. – P. 1119–1143].
50. *Гермейер Ю.Б.* Игры с противоположными интересами. – М.: Наука, 1976. – 326 с. [*Germeyev, Yu.B.* Igrы s neprotivopolozhnyimi interesami. – Moscow: Nauka, 1976. – 326 p. (In Russian)].
51. *Новиков Д.А., Чхартишвили А.Г.* Рефлексия и управление: математические модели. 2-е изд. – М.: ЛЕНАНД, 2022. – 416 с. [*Novikov, D.A., Chkhartishvili, A.G.* Reflection and Control: Mathematical Modeling. 2nd Ed. – Moscow: LENAND, 2022 – 416 p. (In Russian)].
52. *Коргин Н.А., Новиков Д.А.* Иерархические и рефлексивные игры / Теория управления (дополнительные главы): Учебное пособие / Под ред. Д.А. Новикова. – М.: ЛЕНАНД, 2019. – С. 510–546. [*Korgin, N.A., Novikov, D.A.* Hierarchical



- and Reflexive Games / In: *Teoriya upravleniya (dopolnitel'nye glavy)*. Uchebnoye posobiye. Ed. by Novikov, D.A. – Moscow: LENAND, 2019. – P. 510–546. (In Russian)].
53. *Новиков Д.А.* Теория управления организационными системами. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2012. – 604 с. [Novikov, D.A. Control theory of organizational systems. – Moscow: FIZMATLIT, 2012. – 604 p. (In Russian)].
 54. *Бурков В.Н., Буркова И.В., Коргин Н.А., Щепкин А.В.* Модели согласованного комплексного оценивания в задачах принятия решений // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника»*. – 2020. – Т. 20, № 2. – С. 5–13. [Burkov, V.N., Burkova, I.V., Korgin, N.A., Shchepkin, A.V. Modeli soglasovannogo kompleksnogo otsenivaniya v zadachakh prinyatiya reshenij // *Trans. of South Ural State University*. – 2020. – Vol. 20, no. 2. – P. 5–13. (In Russian)].
 55. *Ерешко Ф.И., Горелов М.А.* Иерархическая структура сетевых моделей в экономике и искусственных нейронных сетей // *Тенденции развития Интернет и цифровой экономики: Труды V Всероссийской с международным участием научно-практической конференции*. – Симферополь – Алушта, 2022. [Yereshko, F.I., Gorelov M.A. Hierarchical Structure of Economics Network Models and Artificial Neural Networks // *Tendentsii razvitiya Internet I tsifrovoj ekonomiki. Trudy V Vserossijskoj nauchno-prakticheskoy konferentsii*. – Simferopol–Alushta, 2022. (In Russian)].
 56. *Axelrod, R., Hamilton, W.D.* The Evolution of Cooperation // *Science*. – 1981. – Vol. 211. – P. 1390–1396.
 57. *Riolo, L.R., Cohen, M.D., Axelrod, R.* Evolution of Cooperation without Reciprocity // *Nature*. – 2001. – Vol. 414. – P. 441–443.
 58. *Чеботарев П.Ю., Мальшев В.А., Цодикова Я.Ю.* и др. О сравнительной полезности альтруизма и эгоизма при голосовании в стохастической среде // *Автоматика и телемеханика*. – 2018. – Вып. 11. – С. 123–149. [Chebotarev, P.Yu., Malyshev, V.A., Tsodikov, Ya.Yu., et al. Comparative Efficiency of Altruism and Egoism as Voting Strategies in Stochastic Environment // *Automation and Remote Control*. – 2018. – Vol. 79, no. 11. – P. 2052–2072].
 59. *Studies in Distributed Intelligence. Urban Intelligence and Applications*. Proceedings of ICUIA. Ed. by Elhoseny, M., Yuan, X. – Cham: Springer, 2019. – 252 p.
 60. *Rzevski, G., Skobelev, P.* Emergent Intelligence in Large Scale Multi-Agent Systems // *Intern. J. of Education and Inform. Technol.* – 2007. – Vol. 1, iss. 2. – P. 64–71.
 61. *Городецкий В.И., Бухвалов О.Л., Скобелев П.О., Майоров И.В.* Современное состояние и перспективы промышленных применений многоагентных систем // *Управление большими системами*. – 2017. – Вып. 66. – С. 94–157. [Gorodetskiy, V.I., Bukhvalov, O.L., Skobelev, P.O., Majorov, I.V. Current State and Prospects of Industrial Applications of Multi-agent Systems // *Large-Scale Systems Control*. – 2017. – No. 66. – P. 94–157. (In Russian)].
 62. *Грачев С.П., Жилыев А.А., Ларюхин В.Б.* и др. Методы и средства построения интеллектуальных систем для решения сложных задач адаптивного управления ресурсами в реальном времени // *Автоматика и телемеханика*. – 2021. – № 11. – С. 30–67. [Grachev, S.P., Zhilyaev, A.A., Laryukhin, V.B., et al. Methods and Tools for Developing Intelligent Systems for Solving Complex Real-Time Adaptive Resource Management Problems // *Automation and Remote Control*. – 2021. – Vol. 82, no. 11. – P. 1857–1885.
 63. *Rzevski, G., Skobelev, P., Zhilyaev, A.* Emergent Intelligence in Smart Ecosystems: Conflicts Resolution by Reaching Consensus in Resource Management // *Mathematics*. – 2022. – Vol. 10, no. 11. – Art. no. 1923.
 64. *Chavtam, S.* Emergent Intelligence: A Novel Computational Intelligence Technique to Solve Problems // *Proc. 11th International Conference on Agents and Artificial Intelligence*. – Prague, 2019. – Vol. 1. – P. 93–102.
 65. *Бехтерев В.М.* Коллективная рефлексология. – Петроград: Изд-во «Колос», 1921. – 432 с. [Bekhterev, V.M. Kollektivnaya refleksologiya. – Petrograd: Kolos, 1921. – 432 p. (In Russian)].
 66. *Heylighen, F.* Distributed Intelligence Technologies: Present and Future Applications / In: *The Future Information Society: Social and Technological Problems (World Scientific Information Studies)*. Ed. by Hofkirchner, W., Burgin, M. – New Jersey: World Scientific Pub Co Inc., 2017. – P. 179–212.
 67. *Kyriazis, M.* Systems Neuroscience in Focus: From the Human Brain to the Global Brain? // *Frontiers in Systems Neuroscience*. February. – 2015. – Vol. 9. – Art. no. 7.
 68. *Де Валь Ф.* Политика у шимпанзе: власть и секс у приматов (пер. с англ.). – М: Изд. дом ВШЭ, 2014. – 272 с. [De Waal, F. Chimpanzee Politics: Power and Sex Among Apes. 25th Ed. 2000. – Baltimore: John Hopkins University Press, 2014, 235 p.]
 69. *Олескин А.В.* Биополитика. Политический потенциал современной биологии: философские, политологические и практические аспекты. – М.: Научный мир, 2007. – 508 с. [Oleskin, A.V. Biopolitics. Political Potential of Modern Biology in Philosophy, Political Science and Practice. – Moscow: Nauchnyj mir, 2007. – 508 p. (In Russian)].
 70. *Eibl-Eibesfeld, I.* Human Ethology. – New York: Aldine De Gruyter, 2007. – 848 p.
 71. *Семечкин Н.И.* Социальная психология (2-е изд.). – М.: Юрайт, 2019. – 423 с. [Semechkin, N.I. Social Psychology, 2nd Ed. – Moscow: Yurait, 2019. – 423 p. (In Russian)].
 72. *Де Моз Л.* Психохистория (пер. с англ.). – Ростов-на-Дону: Феникс, 2000. – 512 с. [DeMause, L. Foundations of Psycho-History. – N.Y.: Creative Roots Publ., 1982. – 336 p.]
 73. *Шеллинг Т.К.* Стратегия конфликта (пер. с англ.). – М.: ИРИСЭН, 2016. – 368 с. [Shelling, T.C. The Strategy of Conflict. – Cambridge: Harvard University Press. – 1960. – 309 p.]
 74. *Caffrey, M.B. Jr.* On Wargaming: How Wargames Have Shaped History and How They May Shape the Future. – Newport: Naval War College Press, 2019. – 477 p.
 75. *Макаренко А.В., Чхартишвили А.Г., Шумов В.В.* Системный анализ и прогнозирование безопасности. – М.: ЛЕНАНД, 2022. – 216 с. [Makarenko, A.V., Chkhartishvili, A.G., Shumov, V.V. Sistemnyj analiz i prognozirovanie bezopasnosti. – Moscow: LENAND, 2022. – 216 p. (In Russian)].
 76. *Кривошеев В.Д.* (ред.). Россия и СССР в войнах XX века. Потери вооруженных сил. Статистическое исследование. – М.: ОЛМА-ПИРЕСС, 2001. – 607 с. [Krivosheyev, V.D. (Ed.). Rossiya i SSSR v vojnah XX veka. Poteri vooruzhennukh sil. Statisticheskoye issledovaniye. – Moscow: OLMA PRESS. – 2001. – 607 p. (In Russian)].
 77. *Назаретян А.П.* Цивилизационные кризисы в контексте Универсальной истории. – М.: Мир, 2004. – 367 с. [Nazaretyan, A.P. Civilization Crises with Context of Big (Universal) History. – Moscow: Mir, 2004. – 367 p. (In Russian)].
 78. *Хантингтон С.* Столкновение цивилизаций (пер. с англ.). – М.: АСТ, 2017. – 640 с. [Huntington, S.P. The Clash of Civili-

- zations and the Remaking of World Order. New York: Simon & Shuster, 2007. – 368 p.]
79. *Worldometer* URL: <https://www.worldometers.info/world-population/> (дата обращения 14.11.2023). [Accessed November 14, 2023.]
80. *Култыгин В.П.* Классическая социология. – М: Наука, 2000. – 526 с. [Kultygin, V.P. Classical Sociology. – Moscow: Nauka, 2000. – 526 p. (In Russian)].
81. *Турчин П.В.* Историческая динамика: на пути к теоретической истории, 2-е изд. – М: ЛКИ, 2010. – 368 с. [Turchin, P.V. Historical Dynamics: Why States Rise and Fall. – Princeton: Princeton University Press, 2003. – 264 p.].
82. *Белов М.В., Новиков Д.А.* Модели деятельности (основы математической теории деятельности). – М.: ЛЕНАНД, 2021. – 216 с. [Belov, M.V., Novikov, D.A. Models of Activity (Foundations of Activity Mathematical Theory). – Moscow: LENAND, 2021. – 216 p. (In Russian)].
83. *Белов М.В., Новиков Д.А.* Структура креативной деятельности // Проблемы управления. – 2021. – № 5. – С. 20–33. [Belov, M.V., Novikov, D.A. The Structure of Creative Activity // Control Sciences. – 2021. – No. 5. – P. 17–28.]
84. *Fodor, J.A.* The Modularity of Mind. – Cambridge: MIT Press, 1983. – 158 p.
85. *Ohlsson, S.* Information-Processing Explanations of Insight and Related Phenomena / In: Advances in the Psychology of Thinking. Ed by Keane, M.T. and Gilhooly, K.J. – New York: Harvester Wheatsheaf, 1992. – P. 1–44.
86. *Slovokhotov, Y.L., Neretin, I.S.* Towards Constructing a Modular Model of Distributed Intelligence // Programming & Computer Software. – 2018. – Vol. 44, no. 6. – P. 499–507.
87. *Новиков Д.А.* Модели динамики психических и поведенческих компонент деятельности в коллективном принятии решений // Управление большими системами. – 2020. – Вып. 85. – С. 206–237. [Novikov, D.A. Dynamics Models of Mental and Behavioral Components of Activity in Collective Decision-Making // Large-Scale Systems Control. – 2020. – No. 85. – P. 206–237. (In Russian)].
88. *Губанов Д.А., Новиков Д.А.* Модели совместной динамики мнений и действий в онлайн-социальных сетях. Ч. 1–3. // Проблемы управления. – 2023. – № 2. – С. 37–53; № 3. – С. 40–64; № 4. – С. 14–27. [Gubanov, D.A., Novikov, D.A. Models of Joint Dynamics of Opinions and Actions in Online Social Networks. Parts 1–3 // Control Sciences. – 2023. – No. 2. – P. 31–45; No. 3. – P. 1–54; No. 4. – P. 12–24.]

Статья представлена к публикации членом редколлегии В.Е. Лепским.

*Поступила в редакцию 06.03.2023,
после доработки 11.05.2023.
Принята к публикации 22.05.2023.*

Словохотов Юрий Леонидович – д-р хим. наук, Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, г. Москва; Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,
✉ yurislovo@yandex.ru,
ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-6669-6210>

Новиков Дмитрий Александрович – академик РАН, Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, г. Москва,
✉ novikov@ipu.ru,
ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-9314-3304>

© 2023 г. Словохотов Ю.Л., Новиков Д.А.



Эта статья доступна по [лицензии Creative Commons «Attribution» \(«Атрибуция»\) 4.0 Всемирная.](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)



DISTRIBUTED INTELLIGENCE OF MULTI-AGENT SYSTEMS.

PART II: Collective Intelligence of Social Systems

Yu.L. Slovokhotov^{1,2} and D.A. Novikov¹

¹Trapeznikov Institute of Control Sciences, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

²Department of Materials Science, Moscow State University, Moscow, Russia

✉ yurislovo@yandex.ru, ✉ novikov@ipu.ru

Abstract. Part II of the multi-part survey is devoted to the features and empirical characteristics of distributed intelligence (DI) as the capability of a collective agent (social system) to perceive, process, and use new information in order to achieve its goals. The implementations of DI in human social systems are considered: the crowd wisdom of unstructured communities and the collective intelligence of small groups, organizational systems (OSs), and big systems (states, peoples, and civilizations in historical time). Unlike the swarm intelligence of social insects and animals, collective intelligence in human communities is built up of individuals capable of deep information processing and creative activity. The tight links between the DI of human organizational and social systems and individual human intelligence are emphasized. The increasing contribution of AI to modern collective intelligence is illustrated by flexible resource management in real time. The factors determining the effectiveness of the DI of a multi-agent system are identified as follows: (a) the cognitive capabilities of individuals, (b) the structure of interactions between them, (c) collective goal-setting, (d) external information recording, compression, and processing, and (e) creation of new “images” of the environment and oneself in it. A modular perception model of external influences by an intellectual agent is discussed.

Keywords: multi-agent social systems, collective intelligence, groups, organizational systems, big systems, modular model of perception.

Acknowledgments. We are grateful to Prof., Dr. Sci. (Eng.) O.P. Kuznetsov, Cand. Sci. (Eng.) A.V. Makarenko, and Prof., Dr. Sci. (Eng.) P.O. Skobelev for careful reading of the manuscript and helpful remarks.