

Технологии информационного общества**РОЕВЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ В МОДЕЛИРОВАНИИ
СОЦИАЛЬНО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ**

Статья рекомендована к публикации членом редакционного совета А. Н. Райковым 04.11.2024.

Алферьев Дмитрий Александрович

Кандидат экономических наук

Вологодский научный центр Российской академии наук, Лаборатория интеллектуальных и программно-информационных систем, старший научный сотрудник

Вологда, Российская Федерация

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Высшая инженерно-экономическая школа, доцент

Санкт-Петербург, Российская Федерация

alferev_1991@mail.ru

Нацун Лейла Натиговна

Кандидат экономических наук

Вологодский научный центр Российской академии наук, Центр социально-демографических исследований, старший научный сотрудник

Вологда, Российская Федерация

leyla.natsun@yandex.ru

Ригин Василий Александрович

Вологодский научный центр Российской академии наук, Лаборатория интеллектуальных и программно-информационных систем, заведующий лабораторией

Вологда, Российская Федерация

riginva@mail.ru

Дианов Даниил Сергеевич

Вологодский научный центр Российской академии наук, Лаборатория интеллектуальных и программно-информационных систем, инженер

Вологда, Российская Федерация

daniil.dianov@gmail.com

Аннотация

С обширным распространением компьютерных сетей становятся крайне востребованными технологии их эффективной организации и управления. Роевые алгоритмы являются одним из подобных направлений. В работе описана концепция бионики, как фундаментообразующего столпа технологии роя, разобран муравьиный алгоритм, посредством него смоделирован процесс человеческого выбора.

Ключевые слова

роевой интеллект; бионика; муравьиный алгоритм; моделирование поведения социума; выбор

Введение

«Но и самый плохой архитектор от наилучшей пчелы с самого начала отличается тем, что, прежде чем строить ячейку из воска, он уже построил ее в своей голове» [1, С. 185]. Таким изречением охарактеризовал знаменитый немецкий философ-экономист Карл Генрих Маркс преимущество стратегического мышления человека над животным. Но в 2010 г. группа ученых из Японии и

© Алферьев Д. А., Нацун Л. Н., Ригин В. А., Дианов Д. С., 2025

Производство и хостинг журнала «Информационное общество» осуществляется Институтом развития информационного общества.

Данная статья распространяется на условиях международной лицензии Creative Commons «С указанием авторства – С сохранением условий» версии 4.0 Международная, размещенной по адресу:

<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/legalcode.ru>

https://doi.org/10.52605/16059921_2025_03_136

Великобритании показали, что такой крайне простой живой организм как слизевик (*Physarum Polycephalum*) может наравне с высококвалифицированными инженерами прокладывать оптимальный транспортный маршрут, но делает это в некоторой мере менее энергозатратно [2].

Упомянутому здесь исследованию предшествует сообщение 2000 г., где оговаривается аналогичный эксперимент, но в менее прикладном и более обобщенном виде [3]. И в том и другом случае принял участие PhD (биология) Т. Накагаки (Япония), за что был отмечен в научных кругах двумя Шнобелевскими премиями (2008 г. – в области когнитивных наук, 2010 г. – за планирование транспортных сетей).

Особый интерес в практическом ключе представляет деятельность коллективных насекомых таких как муравьи, термиты, осы, пчелы, шмели, саранча, которая при некотором приближении схожа с той, что протекает в человеческом сообществе. При этом инженерные решения, реализуемые насекомыми, зачастую бывают более эффективными чем разрабатываемые и воплощаемые людьми. Да и, если быть откровенно честными, то многие изобретения сделаны по аналогии с теми, что сконструировала и создала непосредственно сама природа.

Здесь также интересно подметить, что по внешним признакам вроде бы схожие группы, например муравьи и термиты филогенетически являются не такими уж родственными. Но удивительным образом их устройство сообщества во многом повторяет друг друга. Более того схожими являются условно оптимальные инженерные решения обустройства и проектирования жилищ, где они обитают.

Особую склонность к коллективному образу жизни проявляют насекомые из отряда перепончатокрылых. При этом у них присутствует ярко выраженная эусоциальность, характеризующаяся довольно строгой кастовой, иерархической структурой, которая в свою очередь обеспечивается как биологической предрасположенностью, так и регулируется в командно-административной форме со стороны колонии.

Тот или иной рой формирует в рамках своего улья подобие языковой системы причем довольно сложной, включающей выделение феромонов и специфические движения. Он также может заниматься подобием человеческого сельского хозяйства (охрана тли, выращивание грибных садов), ведением войн с другими колониями, рабовладением. В рамках взаимодействия между представителями одного коллектива, как и у людей иногда наблюдается преступное поведение или напротив случаются акты самопожертвования.

Хоть в улье, как отмечалось выше, есть довольно строгая иерархия, в рамках занятой насекомым профориентации она не лишена карьерной лестницы, основанной на опыте и имеющихся навыках отдельно взятого представителя роя. Здесь также отметим, что каждый из них не полная копия друг друга, а вполне себе хорошо выраженная и обозначенная индивидуальность. Более подробно о жизни общественных насекомых можно узнать из беседы В. И. Алипова, к.ф.-м.н., доц. Б. С. Бояршинова и Е. Б. Бояршиновой [4] или в трудах д.б.н., проф. В. Е. Кипяткова [5-6].

Вышеобозначенное наводит нас на следующую мысль, что жизнь насекомых, более простых и примитивных существ по отношению к человеку, все же очень сильно напоминает сообщество людей. Если смоделировать упрощенный, но схожий со сложным объект, научиться им управлять или выявить в нем какие-либо взаимосвязи и закономерности, то этот опыт может быть успешно отмасштабирован. В этой связи целью работы является моделирование поведения примитивных организмов и перенос полученных результатов в прикладную плоскость человеческой жизни.

В рамках этого список задач будет выглядеть следующим образом:

- определить проблемное поле технологии роя в повседневном быту и практике людей;
- технически реализовать один из возможных роевых алгоритмов;
- адаптировать реализованный алгоритм к какому-либо социально-экономическому процессу или явлению.

1 О технологии роя

Очень четко и ясно о технологии роя было поведано человечеству в романе «Непобедимый» известного польского писателя-фантаста и футуролога Станислава Лема. В общих чертах в данной художественной книге описана идея реализации сложной системы путем самоорганизации более простых и примитивных объектов, которые в своей взаимосвязи образуют крайне высокотехнологичный, устойчивый к разрушению конструктор.

Роевые алгоритмы широко и многогранно применяются человеком в своем быту, преимущественно представляя инструмент бионики (научное направление, в соответствии с которым в технических, инженерных системах используются принципы и решения из живой природы) [7], но нередко перенимая что-то и из организации и механизмов неживой природы (наработки по теории хаоса [8]). С их многообразием можно ознакомиться в свежем докладе д.ф.м.н., проф. А.П. Карпенко [9, 0:00-40:00] или его авторском учебном пособии «Современные алгоритмы поисковой оптимизации» [10].

Подробный зарубежный обзор по данной тематике подготовлен группой ученых из Китая [11]. Еще одно обобщение идей и концепций роевого интеллекта представлено в рукописи PhD (информатика) Л.В. Нгуена (Вьетнам) [12].

Сопутствующей тематикой является коллективное принятие решений. Для поиска истины в каком-либо сложном деле необходимо мнение нескольких людей, которые скорректируют и дополняют друг друга. Об этом, в частности, подробно изложено в статье к.ф.м.н., доц. В.И. Протасова и д.э.н., к.ф.м.н. Б.Б. Славина [13].

Из основных преимуществ использования роя по сравнению с эксплуатацией единичного объекта является его устойчивость к выходу из строя или уничтожению. Она обеспечивается избыточностью входящих туда элементов, которые по сути являются взаимозаменяемыми. Идея избыточности также выдвигается PhD (экономика) Н.Н. Талемом (США) как основной инструмент борьбы с Черными лебедями [14].

В то же время избыток какого-либо ресурса тянет за собой проблемы энергоэффективности и возникновения помех, обусловленных высокой плотностью взаимодействующих внутри улья агентов. Это указывает на то, что количество особей управляемого роя должно быть не бесконечно большим, а оптимизироваться в соответствии со спецификой и особенностями решаемой задачи.

С развитием науки многие технологии удешевились, а связь стала более продвинутой и доступной, что позволило создавать в большем количестве недорогую робототехнику, которая в перспективе должна взаимодействовать между собой по принципам функционирования роя. Данная тенденция особенно ярко прослеживается в настоящий момент в военной сфере по направлению дронов-беспилотников, о чем более подробно можно узнать из беседы В.О. Каськова и к.ф.м.н. А.И. Масаловича [15]. При упоминании технологий интернета вещей [16] также будут уместны дискуссии о роевом интеллекте и, собственно, этот момент подтверждается материалом, подготовленным коллективом специалистов из НИУ ВШЭ, где они указывают на наличие данной технологии в следующих инженерно-технических направлениях: беспилотное управление, распределение энергетики и робототехника [17].

Основные проблемы, которые обрисовались в этой связи – это создание между техническими устройствами надежной и стабильной коммуникации, а также разработка способов и методов защиты от подобию заражению. В последнем случае рой должен уметь выявлять внутри себя неправильно функционирующие элементы, а также уметь их быстро купировать и устранять.

Из представленного выше интервью можно подчеркнуть еще один интересный момент, связанный с некоторым преимуществом алгоритма роя частиц по отношению к градиентному спуску. Со слов А. И. Масаловича он более быстро находит экстремумы [15, 14:00-16:00]. На наш взгляд это не всегда так, но метод роя частиц более гибкий и универсальный, что в реальном прикладном аспекте зачастую выступает как преимущество.

Здесь также отметим АОМ (агент-ориентированное моделирование), где основным полем деятельности выступают некие агенты. В компьютерной программе они, по сути, формируют рой и, следовательно, к ним могут применяться соответствующие алгоритмы. Собственно, в ключевой модели Sugarscape основателей агентного подхода PhD (политология) Дж. М. Эпштейна (США) и PhD (информатика) Р. Л. Экстелля (США) человеческий социум представлен через аналогию с насекомыми, которые взаимодействуют друг с другом, разыскивая сахар согласно крайне простым и лаконичным правилам [18].

2 Муравьиный алгоритм

2.1 Математическая основа

Для наглядности оговоренных выше мыслей и идей детальнее рассмотрим такой довольно известный роевой алгоритм как муравьиный. Его разработка обусловлена поиском решения задачи

о коммивояжере, в общих чертах суть которой выражается в обходе всех вершин некоторого графа по кратчайшему маршруту (Рис. 1).

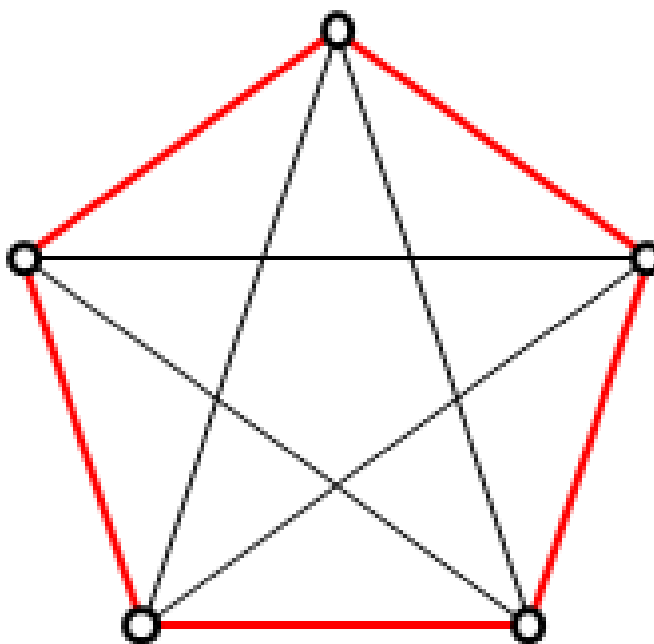


Рис. 1. Граф и передвижение по его вершинам

- – вершины графа;
- – возможные пути передвижения между вершинами графа;
- – оптимальный, наикратчайший маршрут.

Подобная задача может быть однозначно решена путем полного перебора всех возможных вариантов прокладки общего пути до конечной цели, но с увеличением количества вершин графа даже не на очень большую величину их объем становится непомерно огромным (в самом обобщенном случае $n!$, где n – количество вершин графа), в результате чего приходится искать какие-то другие способы решения. Одним из них выступает оговоренный выше муравьиный алгоритм, позволяющий найти так называемое приближенное или условно оптимальное решение.

Создателем данного алгоритма принято считать PhD (информатика) М. Дориго (Италия) и PhD (информатика) Т. Штютцле (Бельгия), идеи которых подробно изложены в их совместной книге «Ant Colony Optimization» [19]. Русскоязычному научному сообществу труд, оговоренных выше зарубежных ученых, был представлен и успешно донесен д.т.н., проф. С. Д. Штовбой (Украина) [20-21].

Основные аспекты, которые учитываются при моделировании муравьиного алгоритма, это расстояния l между звеньями рассматриваемой сети и количество отложенного на путях феромона τ . В этой связи основная формула алгоритма будет выглядеть следующим образом (1):

$$P_{ij} = \frac{\tau_{ij}^{\alpha} \eta_{ij}^{\beta}}{\sum_k \tau_{ik}^{\alpha} \eta_{ik}^{\beta}}, \quad (1)$$

где P_{ij} – вероятность перехода муравья из i -ой вершины в j -ую;

$\tau > 0$ – количество феромона на некотором пути в конкретный момент времени (для его равнозначности по отношению к длине пути в начальный момент времени прокладки маршрута может быть взято значение равное $\frac{1}{l}$; оно же будет являться минимально возможным при затухании);

$\eta = \frac{1}{l}$ – величина обратная расстоянию некоторого пути l ;

k – вершина графа, куда может попасть муравей из города i , и где он еще не был;

$\alpha, \beta \geq 0$ – параметры акцентирования муравья на количестве феромона или длине пути (начальные значения до калибровки советуем взять равными 1).

Теперь детальнее рассмотрим значение величины τ , а именно: как оно может увеличиваться и уменьшаться. Обобщенная формула этого процесса выглядит так (2):

$$\tau^* = p\tau + \Delta\tau, \quad (2)$$

где τ^* – обновленное значение феромона;

$0 \leq p \leq 1$ – коэффициент высыхания феромона, который срабатывает либо дискретно, опираясь на завершение прохождения пути предыдущими муравьями, либо в соответствии с заданной интенсивностью;

$\Delta\tau$ – прирост феромона на некотором пути после посещения его муравьем в самом общем случае на величину $\frac{1}{l}$.

Возвращаясь к интенсивности, оговоренной при описании p , отметим, что она также будет использоваться при отправке муравья из одной вершины графа к последующей. Для ее определения нам потребуется суммарная длина всех путей сети L и их общее количество, которое может быть найдено из следующей формулы (3):

$$\frac{n^2 - n}{2}, \quad (3)$$

где n – количество вершин графа.

Таким образом искомая интенсивность высыхания феромона и отправки муравья в дальнейший путь может быть вычислена посредством выражения, представленного далее (4). Здесь также дополним, что, для того чтобы реализуемый алгоритм был корректно отработан, необходимо задать скорость муравьев через соотношение единицы меры длины путей графа к наглядной размерности времени.

$$L / \frac{n^2 - n}{2} = \frac{2L}{n^2 - n}. \quad (4)$$

2.2 Техническая реализация «муравьев»

Оговоренный выше муравьиный алгоритм реализован нами в компьютерной среде разработки AnyLogic 8.9.1 Personal Learning Edition. Основой для его воплощения послужила статья «Беги, муравей. Беги» [22]. Виртуальные насекомые в нашем случае представлены изображением самолетика (Рис. 2-Рис. 3).

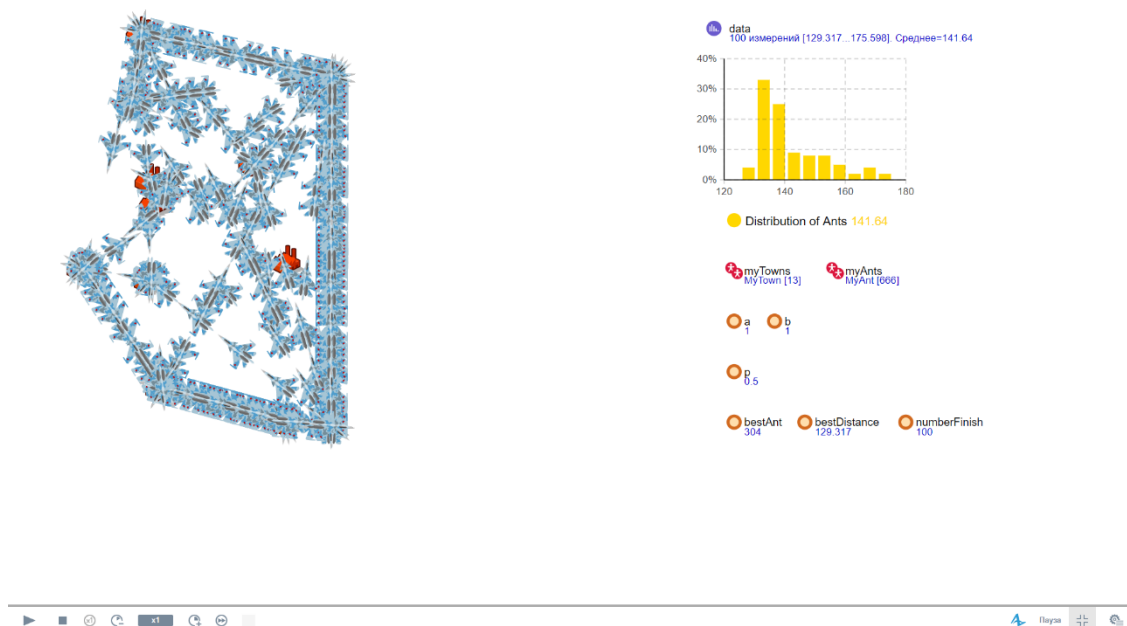


Рис. 2. Простейшая компьютерная симуляция муравьиного алгоритма:
Состояние модели на момент времени 278.19 с

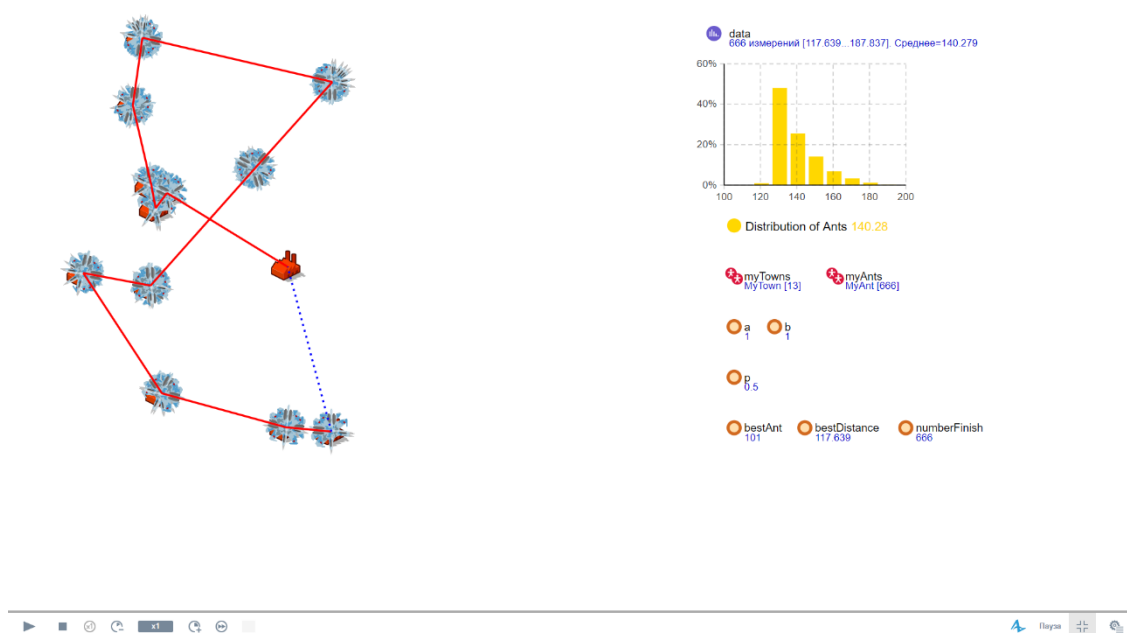


Рис. 3. Простейшая компьютерная симуляция муравьиного алгоритма:
Состояние модели по завершению маршрутов всеми муравьями (632.55 с)

myTown = 13 (ед.) – агенты, характеризующие вершины графа;
myAnt = 666 (ед.) – агенты-муравьи, передвигающиеся со скоростью v равной 1 м/с;
 $a, b = 1$ – параметры акцентирования из формулы (1);
 $p = 0.5$ – коэффициент высыхания феромона из формулы (2);
bestAnt – идентификационный номер муравья, первым прошедшим наилучшую дистанцию реализуемого прогона;
bestDistance (м) – длина обнаруженного наикратчайшего маршрута;
numberFinish (ед.) – количество муравьев, завершивших передвижение;
– – обнаруженный наикратчайший маршрут;
... – замыкающее ребро обнаруженного наикратчайшего маршрута.

Из интересных наблюдений, которые бросились в глаза при проведении компьютерных симуляций, можно отметить то, что при параметрах a, b и p , акцентированных на феромон,

большее количество муравьев популяции проходят свой путь идентично и не так далеко от наименьшего (оптимального), в связи с чем сокращается средняя длина маршрута (Рис. 4). В какой-то мере похожий результат может быть достигнут за счет введения в популяцию муравьев неких элитных особей. Они в отличие от своих соплеменников ходят не вероятностно, а по лучшему на текущий момент маршруту, что позволяет быстрее сформировать четкую и ясную дорогу для всех остальных муравьев [20, С. 73-74; 21, С. 8].

Если же параметры выставлены не удачно, то распределение муравьев будет в большей мере соответствовать нормальному (Рис. 5). При этом может быть получен лучший результат кратчайшего маршрута, достигнутый за счет увеличения в модели вероятностных аспектов. Введение в оборот случая очень часто позволяет значительным образом расширить границы моделирования, а также порой приводит к неожиданным и интересным результатам [23].

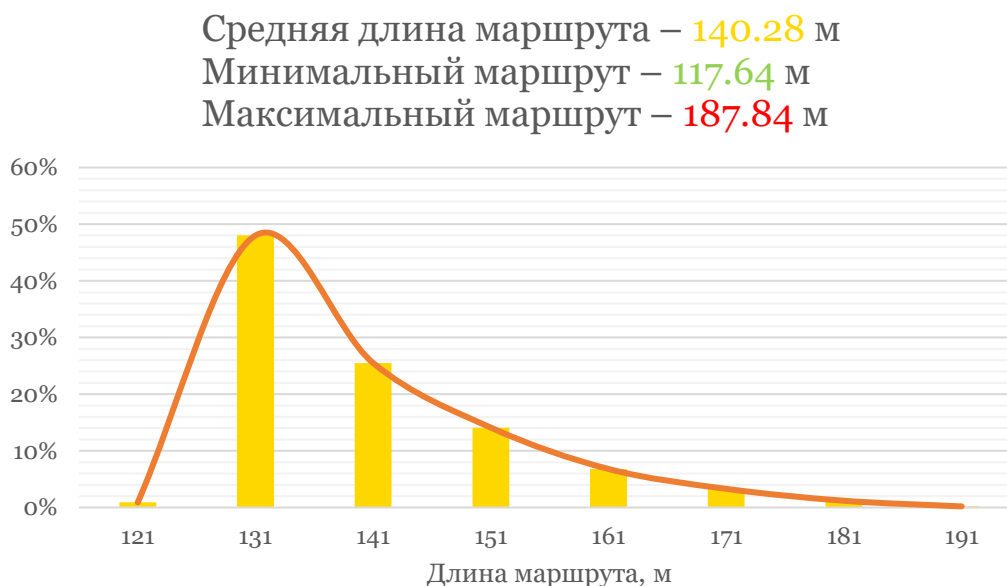


Рис. 4. Распределение муравьев в соответствии с длиной пройденного ими маршрута:
При $a = 1$, $b = 1$ и $p = 0.5$



Рис. 5. Распределение муравьев в соответствии с длиной пройденного ими маршрута
При $a = 0.15$, $b = 0.56$ и $p = 0.29$

Для написания вышеизложенного материала особенно математической части была использована некоторая лекция д.ф.-м.н., проф. М. Н. Кирсанова [24]. Также довольно полезным оказалось видео М. Царькова, где в простой форме изложены некоторые нюансы муравьиного алгоритма, из которых мы бы отметили следующее:

- Во многих случаях человек может найти довольно хорошее решение задачи коммивояжера, опираясь в своем поиске лишь на здравый смысл. Найденный таким образом ответ зачастую попадает в 5 %, максимум в 10 % лучших решений [25, 2:00-5:00];
- Человек неплохо находит условно оптимальный маршрут, если граф представлен визуально, и стоимость перехода из одной его вершины в другую довольно легко и однозначно трактуется. Если граф задан матрицей, а его пути характеризуются разнородными оценками, то человеку становится сложно с ходу определить хороший вариант. Алгоритм же подобных трудностей особо не заметит [25, 4:00-5:00];
- Для поиска оптимального маршрута в задаче коммивояжера муравьев следует выпускать из разных вершин графа, чтобы избежать заикливания прохождения роем определенных последовательностей некоторых путей [25, 16:00-17:00].

3 Использование «муравьев» на практике

Начнем с того, что многие объекты хозяйственной деятельности могут быть представлены сетью различных взаимосвязей, которая в свою очередь является ничем иным как математическим графом. О претворении концепций данного аппарата в быту рекомендуем обратить внимание на статью к.э.н. Д. А. Алферьева и д.э.н., к.и.н., доц. К. А. Гулина, где через граф выражена цепочка добавленной стоимости продукции, в связи с чем появляется возможность ее контроля и оперативного управления [26].

Также в этом ключе интересной работой выступает статья к.э.н., доц. Т. Б. Мельниковой, в которой через графовый инструментарий предпринята попытка анализа и оценки сетей научного сотрудничества [27]. Свежим, фундаментальным, добротным трудом по применению теории графов в прикладной человеческой жизнедеятельности является диссертация к.ф.-м.н. В. А. Хитрой [28]. Не забываем, что муравьи, подробно рассмотренного выше алгоритма, перемещаются именно по графу.

Одними из важнейших проблем человека являются те, которые сопряжены со сферой здравоохранения. Инфраструктура данной отрасли на различных уровнях может быть представлена разнообразными графами, посредством которых может быть отображен переток материальных, финансовых, трудовых и других ресурсов. Аналогом виртуальных муравьев в этих потоках могут выступить люди (пациенты, транспорт, врачи, др.).

Поиск оптимального маршрута в том числе и в сфере здравоохранения может быть осуществлен и другими методами, например средствами линейного программирования [29]. В данной небольшой статье авторы задаются поиском оптимального автопарка карет скорой медицинской помощи, необходимых для эффективного обслуживания населенных пунктов некоторого административно-территориального района.

В цикле работ ученых ИПС им. А. К. Айламазяна РАН предприняты попытки построения оптимального маршрута с целью эффективного посещения пациентами необходимых им врачей [30-32]. В данных статьях довольно хорошо описан класс так называемых «близоруких» алгоритмов, которые по аналогии с ключевой идеей динамического программирования корректируют маршрут, опираясь на текущую обстановку и ситуацию. Подобный подход несет в себе такой безусловный плюс как более-менее понятная интерпретируемость моделируемых ситуаций, чего нельзя сказать в целом о многих других математических методах.

Реализация муравьиного алгоритма также является довольно наглядной и доступной к пониманию специалистам, деятельность которых напрямую не связана с программированием и математикой. Дополнительно к этому поведение колонии муравьев легко ассоциируется с упрощенной жизнедеятельностью человеческого социума, и, следовательно, результаты, полученные на виртуальных муравьях, могут быть гораздо легче перенесены в хозяйственный обиход людей. Концепция муравьев также хорошо интегрируется в агент-ориентированный подход, который является одним из современных и перспективных способов моделирования социально-экономических процессов (более подробно о нем можно прочитать по следующей ссылке [33]).

Через муравьиный алгоритм может быть предпринята попытка реализации модели, имитирующей выбор пациентами соответствующих больничных учреждений и, как следствие, их загруженность или простой. Одним из ориентиров для пациентов также будет служить маршрут, который им необходимо преодолеть до заветной цели. В качестве феромона может выступить некая агрегированная оценка медицинского учреждения.

Самым простым вариантом подобной метрики на наш взгляд являются оценки об интересующем нас месте, размеченном в какой-либо ГИС (геоинформационная система), например, Google или Яндекс Картах. В более сложном ключе могут быть использованы некие интегральные оценки, представляющие собой агрегатор различных разнородных показателей.

О подобном измерении относительно медицинских учреждений группой ученых из НИИОЗММ ДЗМ написана небольшая брошюра [34]. В более общих чертах в разрезе отраслей народного хозяйства исследовательской группой СПбПУ подготовлена статья, где представлен вариант оценки цифрового образа компании [35]. О вариантах свертки различных статистических метрик в единый показатель нами также подготовлен довольно развернутый материал, представленный в следующей статье [36, pp. 10-11].

3.1 Выбор роддома

Теперь для примера решим гипотетическую задачу. В поселке Шексна отсутствует роддом в результате чего беременные женщины ориентируются на два близлежащих города: Вологду и Череповец. Длина автомобильной трассы до первого составляет примерно 79,7 км, а до второго – 34,6 км (маршруты построены автоматически инструментами AnyLogic посредством обращения к серверам OpenStreetMap).

Усредненная оценка учреждений по поисковому запросу «вологда роддом» в Яндекс Картах, взятая на момент написания статьи, составила примерно 3,7 балла из 5, по «череповец роддом» – 3,9. Для того, чтобы они корректно отработали в муравьином алгоритме, их необходимо отмасштабировать, например, по следующей формуле (5):

$$\tau^* = \frac{\tau \bar{\eta}}{\bar{\tau}}, \quad (5)$$

где τ – оценка интересующего нас объекта в баллах;

$\bar{\tau}$ – среднее значение оценки в баллах среди всех интересующих нас объектов;

$\bar{\eta}$ – среднее значение обратной величины пути до интересующего нас объектов.

Таким образом в соответствии с имеющимися данными и α с β , заданными на уровне 1, вероятное желание беременных женщин из Шексны провести роды в Вологде составляет примерно 0,29, а в Череповце – 0,71. При наличии значений скоростей движения по автомобильным трассам, численности женщин и интенсивности рождения детей рассмотренная в примере ситуация может быть неплохо реализована в среде AnyLogic (Рис. 6).

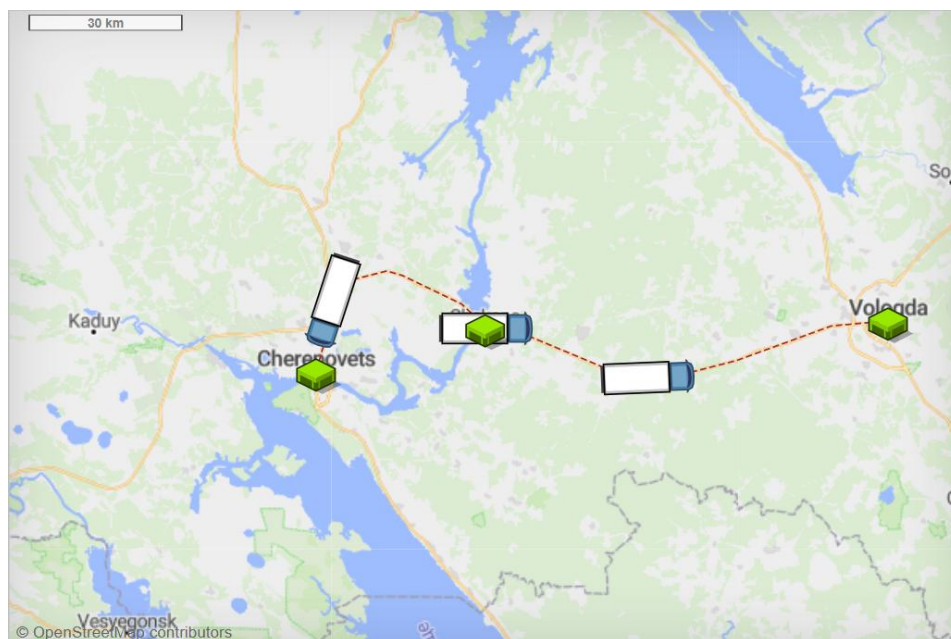


Рис. 6. Распределение беременных по роддомам

- – пункты, между которыми перемещаются агенты (Череповец, Шексна, Вологда);
□ – агенты (женщины), перемещающиеся между заданными пунктами;
--- – автодорога.

3.2 Выбор стоматолога

Рассмотрим еще один пример. В нем мы попытаемся в тех же самых населенных пунктах смоделировать выбор населением стандартных стоматологических услуг, а именно – где бы оно предпочло лечить свои зубы?

Помимо поездки за город пациент может обратиться за помощью по месту жительства. В этой связи к предыдущим исходным данным, связанным с расстоянием маршрутов, добавится длина путей, характеризующих перемещение внутри соответствующих населенных пунктов. Ее значение возьмем как квадратный корень площади интересующей нас геолокации (Таблица 2).

Таблица 1. Расстояния до соответствующих населенных пунктов, км

	Вологда	Череповец	Шексна
Вологда	10,8	114,3	79,7
Череповец	114,3	11	34,6
Шексна	79,7	34,6	3,1

Усредненная оценка учреждений по поисковому запросу «вологда стоматология» в Яндекс Картах, зафиксированная на момент написания статьи, составила примерно 4,2 балла из 5, по «череповец стоматология» – 4,1, «шексна стоматология» – 3,5. При α и β , взятыми на уровне 1, вероятное желание населения, соответствующих населенных пунктов, лечить зубы в том или ином месте распределилось следующим образом (табл. 2):

Таблица 2. Распределение желания населения в оказании ему стандартных стоматологических услуг в соответствующем населенном пункте

	Вологда	Череповец	Шексна
Население Вологды	0,83	0,08	0,09
Население Череповца	0,07	0,73	0,2
Население Шексны	0,04	0,09	0,87

Если предположить, что стандартные стоматологические услуги во всех населенных пунктах по качеству примерно одинаковые, то ориентиром в этом случае может выступить их стоимость. Явление, связанное с поиском приемлемого для себя медицинского сервиса (соотношение качества и цены), получило название в обиходе «медицинского туризма».

Согласно информационному стоматологическому агрегатору 32top стоимость лечения кариеса в Вологде в октябре 2024 г. составляла от 3,5 тыс. руб. до 7 тыс. руб., в Череповце – от 3,5 тыс. руб. до 4 тыс. руб. Согласно интернет-ресурсу 1vrach.ru цена за аналогичные услуги по Шексне в то же самое время была зафиксирована на уровне 2 тыс. руб. Если взять эти данные вместо усредненной оценки учреждений (берем обратную величину, так как чем больше цена, тем хуже), то получится следующее распределение желания (Таблица 3):

Таблица 3. Распределение желания населения в оказании ему стандартных стоматологических услуг в соответствующем населенном пункте при значимости их стоимости

	Вологда	Череповец	Шексна
Население Вологды	0,68	0,09	0,23
Население Череповца	0,04	0,61	0,35
Население Шексны	0,01	0,05	0,94

Как можно заметить, оно отличается от предыдущего (Таблица 2). Значительный поток внимания при учете стоимости цен перенаправился в сторону Шексны. Это обуславливает нас как исследователей при моделировании поведения населения определять правильные стимулы, побуждающие его к тому или иному выбору.

Выводы

Подведем итоги:

- Роевый интеллект в настоящий момент находит свое применение в управлении сложных технических систем, связанных с робототехникой, беспилотниками и оптимальным распределением энергоресурсов. С развитием цифровых технологий у него есть очень большой потенциал быть успешно использованным в социально-экономической сфере.
- Муравьиный алгоритм является одним из наглядных и доступно интерпретируемых методов роевого интеллекта. Моделирование выбора колонией муравьев сопоставимо с тем, который осуществляет человеческий социум.

Основное развитие муравьиный алгоритм имеет в части, связанной с обновлением и распределением феромона. Помимо его базового представления мы уже отмечали некоторые аспекты муравьиной системы с элитарными особями (EAS – Elitist Ant System). Также довольно распространенной модификацией алгоритма является его ранговый вариант RAS – Rank Ant System (феромон откладывается муравьями пропорционально рейтингу проложенных колонией маршрутов) и максиминный MMAS – Max-Min Ant System (выставляются границы максимально и минимально возможного количества феромона на ребрах графа).

С другими специфическими дополнениями компьютерных муравьиных систем можно ознакомиться в статье к.ф.-м.н., доц. Ю.Ю. Дюличевой [37, С. 39]. Также большой объем работ по затронутой нами теме подготовлен к.т.н. А.А. Кажаровым и д.т.н., проф. В.М. Курейчиком. Их наиболее цитируемой совместной статьей является рукопись «Муравьиные алгоритмы для решения транспортных задач» [38]. Дополнительно отметим, что большинство разрабатываемых модификаций для «муравьев» не носят принципиально качественного характера (их цель – ускорение сходимости без потери эффективности искомого результата), в этой связи будущим исследователям необходимо обратить большее внимание на разработку дополнений, имитирующих что-то новое в поведении насекомых.

- Муравьиный алгоритм был успешно использован нами при моделировании выбора населением некоторых медицинских услуг (репродуктивное здоровье и стоматология). Важным аспектом в его воплощении является определение стимула к побуждению в качестве «феромона». Полученные результаты могут быть отмасштабированы на другие территории и, соответственно, по другим направлениям хозяйственной деятельности людей.

Благодарности

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-28-01783 (<https://rscf.ru/project/24-28-01783/>).

Литература

1. Маркс К. Г. Капитал: Критика политической экономии в 3 т.: Т. I – Процесс производства капитала / под ред. И. И. Степанова-Скворцова. М.: Политиздат, 1952. 797 с.
2. Tero A., Takagi S., Saigusa T., Ito K., Bebbler D.P., Fricker M.D., Yumiki K., Kobayashi R., Nakagaki T. Rules for Biologically Inspired Adaptive Network Design // Science. 2010. V. 327. № 5964. Pp. 439-442. DOI: 10.1126/science.11778.
3. Nakagaki T., Yamada H., Tóth Á. Maze-solving by an Amoeboid Organism // Nature. 2000. V. 407. P. 470. DOI: 10.1038/35035159.
4. Бояршинов Б. С. Интеллект насекомых – это будущее человечества? // YouTube. 2023. URL: <http://youtube.com/watch?v=m6npU4OR1ZI> (дата обращения: 01.10.24).
5. Кипятков В. Е. Мир общественных насекомых. Л.: ЛГУ, 1991. 408 с.
6. Кипятков В. Е. Поведение общественных насекомых. М.: Знание, 1991. 64 с.
7. Малинецкий Г. Г., Смолин В. С. Бионическое сознание – интуиция и мышление без использования логики // Искусственный интеллект: Теория и практика. 2023. № 2(2). С. 2-13. EDN: CIWZPO.
8. Глик Дж. Хаос: Создание новой науки / под ред. М. С. Нахмансона, Е. А. Барашковой. М.: АСТ, 2021. 416 с.
9. Карпенко А. П. Применение, математические модели, методы и алгоритмы роевого интеллекта // YouTube. 2023. URL: <http://youtube.com/watch?v=gjX7W50ebwY> (дата обращения: 01.10.24).
10. Карпенко А. П. Современные алгоритмы поисковой оптимизации: Алгоритмы, вдохновленные природой: уч. пособ. 3 изд., испр. М.: МГТУ, 2021. 448 с. EDN: NCAEFY.
11. Li H., Liao B., Li J., Li Sh. A Survey on Biomimetic and Intelligent Algorithms with Applications // Biomimetics. 2024. V. 9. № 8. 453. 29 p. DOI: 10.3390/biomimetics9080453.
12. Nguyen L. V. Swarm Intelligence-Based Multi-Robotics: A Comprehensive Review // AppliedMath. 2024. V. 4. № 4. Pp. 1192-1210. DOI: 10.3390/appliedmath4040064.
13. Протасов В. И., Славин Б. Б. Совершенствование инструментов электронной демократии с использованием коллективного интеллекта // Информационное общество. 2017. № 2. С. 37-44. EDN: ZOFQDV.
14. Талей Н. Н. Антихрупкость: Как извлечь выгоду из хаоса / под ред. Н. Караева. М.: Азбука-Аттикус, 2022. 768 с.
15. Каськов В.О. Роевый интеллект: Развитие беспилотных технологий (Андрей Масалович) // YouTube. 2023. URL: <http://youtube.com/watch?v=GBxJFrIhqY> (дата обращения: 01.10.24).
16. Гулин К. А., Усков В. С. О роли интернета вещей в условиях перехода к четвертой промышленной революции // Проблемы развития территории. 2017. № 4(90). С. 112-131. EDN: ZCMXIJ.
17. Бахтин П., Соколова А., Микова Н., Кисилева Л., Гутарук Е., Назаретян К., Воронин К. «Роевый интеллект» технических систем // ИСИЭЗ. 2015. URL: <http://issek.hse.ru/trendletter/news/160287919.html> (дата обращения: 21.10.24).
18. Epstein J. M., Axtell R. L. Growing Artificial Societies: Social Science from the Bottom Up. Cambridge: MIT Press, 1996. 226 p. DOI: 10.7551/mitpress/3374.001.0001
19. Dorigo M., Stützle Th. Ant Colony Optimization. Cambridge: MIT Press, 2004. pdf-321 p. DOI: 10.7551/mitpress/1290.001.0001.
20. Штовба С. Д. Муравьиные алгоритмы // Exponenta Pro: Математика в приложениях. 2003 № 4(4). С. 70-75.
21. Штовба С. Д. Муравьиные алгоритмы: теория и применение // Программирование. 2005. Т. 31. № 4. С. 3-18. EDN: HSCQV.
22. П. А. Беги, муравей. Беги // Хабр. 2020. URL: <http://habr.com/ru/articles/500994> (дата обращения: 01.10.24).
23. Алферьев Д. А. Проблема конечного автомата как интеллектуального агента / под ред. Р.Н. Павлова // VIII Научно-практическая конференция «Молодая экономика:

- Экономическая наука глазами молодых ученых». Москва, 9 дек. 2022. М.: ЦЭМИ РАН, 2023. С. 5-7. URL: <http://www.cemi.rssi.ru/publication/books/Sbornik-Pavlov-2023-1.pdf> (дата обращения: 02.10.24).
24. Кирсанов М. Н. Муравьиный алгоритм // YouTube. 2012. URL: http://youtube.com/watch?v=EwDP_bAb-OI (дата обращения: 02.10.24).
 25. Царьков М. Роевый интеллект: Муравьиный алгоритм // YouTube. 2021. URL: <http://youtube.com/watch?v=8KTzAiusfPs> (дата обращения: 02.10.24).
 26. Алферьев Д. А., Гулин К. А. Разработка инструментов моделирования цепочек высокотехнологичной продукции лесного хозяйства // Проблемы развития территории. 2023. Т. 27. № 6. С. 83-103. DOI: 10.15838/ptd.2023.6.128.6
 27. Мельникова Т. Б. Аналитическое и математическое описание особенностей структуры сетей знаний в малых городах // Проблемы развития территории. 2023. Т. 27. № 4. С. 150-168. DOI: 10.15838/ptd.2023.4.126.9.
 28. Хитрая В. А. Теоретико-игровые меры центральности в сетях и приложения: диссерт. / под ред. В. В. Мазалова // СПбГУ. 2024. 129 с. URL: http://disser.spbu.ru/files/2024/disser_khitraya_vitalia.pdf (дата обращения: 02.10.24).
 29. Дианов С. В., Алферьев Д. А., Дианов Д. С. Решение задачи оптимизации автопарка отделения скорой медицинской помощи с использованием аппарата линейного программирования / под ред. В.А. Горбунова // XII Международная научно-техническая конференция «Интеллектуально-информационные технологии и интеллектуальный бизнес» (ИНФОС-2021). Вологда, 29-30 июня 2021. Вологда: ВоГУ, 2021. С. 125-128. EDN: IIDMNB.
 30. Ованесян А. А., Левичев А. В. Алгоритмы распределения врачебных направлений в медицинской организации // Программные системы: Теория и приложения. 2019. Т. 10. № 4(43). С. 163-180. DOI: 10.25209/2079-3316-2019-10-4-163-180.
 31. Ованесян А. А., Левичев А. В., Бельшев Д. В. Алгоритмы решения задач составления расписания диагностических и лечебных мероприятий в медицинской информационной системе // Врач и информационные технологии. 2020. № 5. С. 17-23. DOI: 10.37690/1811-0193-2020-5-17-23
 32. Ованесян А. А., Левичев А. В., Бельшев Д. В., Цирлин А. М. Задачи распределения медицинских направлений // Врач и информационные технологии. 2019. № 4. С. 48-57. DOI: 10.37690/1811-0193-2019-4-48-57
 33. Alfer'ev D. A., Dianov S. V., Gulin K. A., Shcherbin V. K., Dianov D. S. Modeling of Socio-economic Processes – Agent Systems / Devezas, T. C., Berawi, M. A., Barykin, S. E., Kudryavtseva, T. Yu. (eds) // Lecture Notes in Networks and Systems. V. 951: Understanding the Digital Transformation of Socio-Economic-Technological Systems: Dedicated to the 120th Anniversary of Economic Education at Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University. Cham: Springer, 2024. Pp. 123-149. DOI: 10.1007/978-3-031-56677-6_9
 34. Аксенова Е. И., Медведева Е. И., Крошилин С. В. Оценка интеллектуального потенциала медицинских организаций: Тренды в России и зарубежные практики: эксперт. обзор. М.: НИИОЗММ ДЗМ, 2023. 42 с. EDN: CXRDCC.
 35. Rodionov D. G., Kryzhko D. A., Tenishev T. V., Uimanov V., Abdulmanova A., Kvikvinia A. M., Aksenov P. N., Solovyov M., Kolomenskii F., Konnikov E.A. Methodology for Assessing the Digital Image of an Enterprise with Its Industry Specifics // Algorithms. 2022. V. 15. № 6. 177. 20 p. DOI: 10.3390/a15060177
 36. Zaytsev A. A., Mihel E. A., Dmitriev N. D., Alferyev D. A., Laszlo U. Optimization of Interaction with Counterparties: Selection Game Algorithm under Uncertainty // Mathematics. 2024. V. 12. № 13. 2079. 26 p. DOI: 10.3390/math12132079
 37. Дюличева Ю. Ю. Алгоритмы роевого интеллекта и их применение для анализа образовательных программ // Открытое образование. 2019. Т. 23. № 5. С. 33-43. DOI: 10.21686/1818-4243-2019-5-33-43
 38. Кажаров А. А., Курейчик В. М. Муравьиные алгоритмы для решения транспортных задач // Известия РАН: Теория и системы управления. 2010. № 1. С. 32-45. EDN: LOIUXX.

SWARM INTELLIGENCE IN MODELLING SOCIO-ECONOMIC PROCESSES

Alfer'ev, Dmitry Aleksandrovich

Candidate of economic sciences

Vologda Research Center of the Russian Academy of Sciences, Laboratory of intelligent and software-information systems, senior researcher

Vologda, Russian Federation

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Graduate school of industrial economics, associate professor

Saint Petersburg, Russian Federation

alferev_1991@mail.ru

Natsun, Leila Natigovna

Candidate of economic sciences

Vologda Research Center of the Russian Academy of Sciences, Center for social and demographic research, senior researcher

Vologda, Russian Federation

leyla.natsun@yandex.ru

Rigin, Vasilii Aleksandrovich

Vologda Research Center of the Russian Academy of Sciences, head of Laboratory of intelligent and software-information systems

Vologda, Russian Federation

riginva@mail.ru

Dianov, Daniil Sergeevich

Vologda Research Center of the Russian Academy of Sciences, Laboratory of intelligent and software-information systems, engineer

Vologda, Russian Federation

daniil.dianov@gmail.com

Abstract

With the spread of computer networks, their organization is becoming extremely popular. Swarm algorithms are one of such areas. We describe the concept of bionics that underlies the swarm, analyze the ant algorithm and model human choice with its help.

Keywords

swarm intelligence; bionics; ant algorithm; modeling of social behavior; choice

References

1. Marx, K. H. Kapital: Kritika politicheskoy ekonomii in 3 volumes: V. I – Protsess proizvodstva kapitala / Stepanov-Skvortsov, I. I. (eds). Moscow: Politizdat, 1952. 797 p.
2. Tero, A., Takagi, S., Saigusa, T., Ito, K., Bebber, D. P., Fricker, M. D., Yumiki, K., Kobayashi, R., Nakagaki, T. Rules for Biologically Inspired Adaptive Network Design // Science. 2010. V. 327. № 5964. Pp. 439-442. DOI: 10.1126/science.11778
3. Nakagaki, T., Yamada, H., Tóth, Á. Maze-solving by an Amoeboid Organism // Nature. 2000. V. 407. P. 470. DOI: 10.1038/35035159
4. Boyarshinov, B. S. Intellect nasekomykh – eto budushcheye chelovechestva? // YouTube. 2023. URL: <http://youtube.com/watch?v=m6npU4OR1ZI> (accessed: 01.10.24).
5. Kipyatkov, V. Ye. Mir obshchestvennykh nasekomykh. Leningrad: Leningrad State University, 1991. 408 p.
6. Kipyatkov, V. Ye. Povedeniye obshchestvennykh nasekomykh. Moscow: Znaniye, 1991. 64 p.
7. Malinetsky, G. G., Smolin, V. S. Bionic Consciousness – Intuition and Thinking without Using Logic // Iskusstvennyy intellekt: Teoriya i praktika. 2023. № 2(2). Pp. 2-13. EDN: CIWZPO.

8. Glick, J. Khaos: Sozdaniye novoy nauki / Nakhmanson, M.S., Barashkova, Ye.A. (eds). Moscow: AST, 2021. 416 p.
9. Karpenko, A. P. Primeneniye, matematicheskiye modeli, metody i algoritmy royevogo intellekta // YouTube. 2023. URL: <http://youtube.com/watch?v=gjX7W50ebwY> (accessed: 01.10.24).
10. Karpenko, A. P. Sovremennyye algoritmy poiskovoy optimizatsii: Algoritmy, vdokhnovlennyye prirodoy: manual. 3 ed., corrected. Moscow: Moscow State Technical University, 2021. 448 p. EDN: NCAEFY.
11. Li, H., Liao, B., Li, J., Li, Sh. A Survey on Biomimetic and Intelligent Algorithms with Applications // Biomimetics. 2024. V. 9. № 8. 453. 29 p. DOI: 10.3390/biomimetics9080453
12. Nguyen, L. V. Swarm Intelligence-Based Multi-Robotics: A Comprehensive Review // AppliedMath. 2024. V. 4. № 4. Pp. 1192-1210. DOI: 10.3390/appliedmath4040064
13. Protasov, V.I., Slavin, B.B. Improving E-democracy Tools with the Use of Collective Intelligence Technology // Information Society. 2017. № 2. Pp. 37-44. EDN: ZOFQDV.
14. Taleb, N. N. Antikhrupkost': Kak izvlech' vygodu iz khaosa / Karaev, N. (eds). Moscow: Azbuka-Attikus, 2022. 768 p.
15. Kaskov, V. O. Royevyy intellekt: Razvitiye bespilotnykh tekhnologiy (Andrey Masalovich) // YouTube. 2023. URL: <http://youtube.com/watch?v=GBxJFrIhqY> (accessed: 01.10.24).
16. Gulin, K. A., Uskov, V. S. On the Role of the Internet of Things in the Conditions of Transition to the Fourth Industrial Revolution // Problems of Territory's Development. 2017. № 4(90). Pp. 112-131. EDN: ZCMXIJ.
17. Bakhtin, P., Sokolova, A., Mikova, N., Kisileva, L., Gutaruk, E., Nazaretyan, K., Voronin, K. «Royevoy intellekt» tekhnicheskikh sistem // HSE ISSEK. 2015. URL: <http://issek.hse.ru/trendletter/news/160287919.html> (accessed: 21.10.24).
18. Epstein, J. M., Axtell, R. L. Growing Artificial Societies: Social Science from the Bottom Up. Cambridge: MIT Press, 1996. 226 p. DOI: 10.7551/mitpress/3374.001.0001
19. Dorigo, M., Stützle, Th. Ant Colony Optimization. Cambridge: MIT Press, 2004. pdf-321 p. DOI: 10.7551/mitpress/1290.001.0001
20. Shtovba, S. D. Murav'inye algoritmy // Exponenta Pro: Matematika v prilozheniyakh. 2003 № 4(4). Pp. 70-75.
21. Shtovba, S. D. Ant Algorithms: Theory and Applications // Programming and Computer Software. 2005. V. 31. № 4. Pp. 3-18. EDN: HSCKQV.
22. P., A. Begi, muravey. Begi // Habr. 2020. URL: <http://habr.com/ru/articles/500994> (accessed: 01.10.24).
23. Alfer'ev, D. A. Problema konechnogo avtomata kak intellektual'nogo agenta / Pavlov, R. N. (eds) // VIII Nauchno-prakticheskaya konferentsiya « Molodaya ekonomika: Ekonomicheskaya nauka glazami molodykh uchenykh». Moscow, 9 December 2022. Moscow: Central Economics and Mathematics Institute of the Russian Academy of Sciences, 2023. Pp. 5-7. URL: <http://www.cemi.rssi.ru/publication/books/Sbornik-Pavlov-2023-1.pdf> (accessed: 02.10.24).
24. Kirsanov, M. N. Murav'inyy algoritm // YouTube. 2012. URL: http://youtube.com/watch?v=EwDP_bAb-OI (accessed: 02.10.24).
25. Tsarkov, M. Royevyy intellekt: Murav'inyy algoritm // YouTube. 2021. URL: <http://youtube.com/watch?v=8KTzAiusfPs> (accessed: 02.10.24).
26. Alfer'ev, D. A., Gulin, K. A. Development of Tools for Modeling High-tech Forestry Product Chains // Problems of Territory's Development. 2023. V. 27. № 6. Pp. 83-103. DOI: 10.15838/ptd.2023.6.128.6
27. Melnikova, T. B. Analytical and Mathematical Description of the Structure Features of Knowledge Networks in Small Cities // Problems of Territory's Development. 2023. V. 27. № 4. Pp. 150-168. DOI: 10.15838/ptd.2023.4.126.9
28. Khitraya, V. A. Teoretiko-igrovyye mery tsentral'nosti v setyakh i prilozheniya: dissertation / Mazalov, V. V. (eds) // St. Petersburg State University. 2024. 129 p. URL: http://diss.spbu.ru/files/2024/diss_khitraya_vitalia.pdf (accessed: 02.10.24).
29. Dianov, S. V., Alfer'ev, D. A., Dianov, D. S. Resheniye zadachi optimizatsii avtoparka otdeleniya skoroy meditsinskoy pomoshchi s ispol'zovaniyem apparata lineynogo programmirovaniya / Gorbunov, V.A. (eds) // XII Mezhdunarodnaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya «Intellektual'no-informatsionnyye tekhnologii i intellektual'nyy biznes» (INFOS-2021). Vologda, 29-30 June 2021. Vologda: Vologda State University, 2021. Pp. 125-128. EDN: IIDMHB.

30. Ovanesyan, A. A., Levichev, A. V. Algorithms of distribution of medical appointments in a medical organization // Program Systems: Theory and Applications. 2019. V. 10. № 4(43). Pp. 163-180. DOI: 10.25209/2079-3316-2019-10-4-163-180
31. Ovanesyan, A. A., Levichev, A. V., Belyshev, D. V. Algorithms for Solving Problems of Scheduling Diagnostic and Therapeutic Measures in a Medical Information System // Medical Doctor and IT. 2020. № 5. Pp. 17-23. DOI: 10.37690/1811-0193-2020-5-17-23.
32. Ovanesyan, A. A., Levichev, A. V., Belyshev, D. V., Tsirlin, A. M. Tasks of Distribution of Medical Appointments // Medical Doctor and IT. 2019. № 4. Pp. 48-57. DOI: 10.37690/1811-0193-2019-4-48-57
33. Alfer'ev, D. A., Dianov, S. V., Gulin, K. A., Shcherbin, V. K., Dianov, D. S. Modeling of Socio-economic Processes – Agent Systems / Devezas, T. C., Berawi, M. A., Barykin, S. E., Kudryavtseva, T. Yu. (eds) // Lecture Notes in Networks and Systems. V. 951: Understanding the Digital Transformation of Socio-Economic-Technological Systems: Dedicated to the 120th Anniversary of Economic Education at Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University. Cham: Springer, 2024. Pp. 123-149. DOI: 10.1007/978-3-031-56677-6_9
34. Aksenova, Ye. I., Medvedeva, Ye. I., Kroshilin, S. V. Otsenka intellektual'nogo potentsiala meditsinskikh organizatsiy: Trendy v Rossii i zarubezhnyye praktiki: expert review. Moscow: Research Institute for Healthcare Organization and Medical Management of Moscow Healthcare Department, 2023. 42 p. EDN: CXRDCC.
35. Rodionov, D. G., Kryzhko, D. A., Tenishev, T. V., Uimanov, V., Abdulmanova, A., Kvikvinia, A. M., Aksenov, P. N., Solovyov, M., Kolomenskii, F., Konnikov, E. A. Methodology for Assessing the Digital Image of an Enterprise with Its Industry Specifics // Algorithms. 2022. V. 15. № 6. 177. 20 p. DOI: 10.3390/a15060177
36. Zaytsev, A. A., Mihel, E. A., Dmitriev, N. D., Alferyev, D. A., Laszlo, U. Optimization of Interaction with Counterparties: Selection Game Algorithm under Uncertainty // Mathematics. 2024. V. 12. № 13. 2079. 26 p. DOI: 10.3390/math12132079
37. Dyulicheva, Yu. Yu. The swarm intelligence algorithms and their application for the educational data analysis // Open Education. 2019. V. 23. № 5. Pp. 33-43. DOI: 10.21686/1818-4243-2019-5-33-43
38. Kazharov, A. A., Kureichik, V. M. Ant Colony Optimization Algorithms for Solving Transportation Problems // Journal of Computer and Systems Sciences International. 2010. № 1. Pp. 32-45. EDN: LOIUXX.