

# Новый инструментарий в общественных науках — агент-ориентированные модели: общее описание и конкретные примеры

New instruments in social sciences — agent-oriented models: general description and specific examples

УДК 316.42



## В. Л. Макаров

директор Центрального экономико-математического института РАН, доктор физико-математических наук, профессор, академик РАН, почетный профессор СПбАУЭ 117418, Москва, Нахимовский пр., д. 47

## V. L. Makarov

117418, Moscow, Nakhimovskiy pr., 47



## А. Р. Бахтизин

старший научный сотрудник Центрального экономико-математического института РАН, доктор экономических наук 117418, Москва, Нахимовский пр., д. 47

## A. R. Bakhtizin

117418, Moscow, Nakhimovskiy pr., 47

В статье приведены сведения об агент-ориентированных моделях (АОМ). Рассмотрена классификация АОМ и их преимущества перед другими инструментами моделирования социально-экономических процессов.

The article presents information on agent-oriented models (AOM). It reviews AOM classification and their advantages compared with other modeling instruments in social and economic processes modeling.

**Ключевые слова:** агент-ориентированные модели (АОМ), системная динамика (СД), дискретно-событийное моделирование (ДС), геоинформационная система (ГИС)

**Keywords:** agent-oriented models (AOM), system dynamics (SD), discrete and event modeling (DE), geo-information system (GIS)

Общественные науки, в том числе экономические, стоят на пороге масштабного и эффективного использования нового средства для получения знаний об обществе. Это так называемые агент-ориентированные модели (*agent based models*, сокращенно АОМ), относящиеся к классу моделей, основанных на индивидуальном поведении агентов и создаваемых для компьютерных симуляций. Основная идея, лежащая в основе АОМ, заключается в построении вычислительного инструмента, представляющего собой совокупность агентов с определенным набором свойств и позволяющего проводить симуляции реальных явлений. При этом сами модели, используя простые правила поведения агентов, могут выдавать весьма интересные результаты.

В статье приведены сведения об АОМ, включая определения, краткую историю возникновения моделей этого класса, описание их преимуществ перед другими инструментами моделирования социально-экономических процессов. Помимо этого, рассмотрены классические АОМ и программное обеспечение для их технической реализации. И, в заключение, приведены краткие описания АОМ, разработанных в Центральном экономико-математическом институте РАН.

### 1. Сложившееся определение АОМ

Определений АОМ достаточно много (см., напр., [1–3]). В свою очередь мы предлагаем свое, которое,

с одной стороны, является симбиозом определений, данных наиболее авторитетными экспертами в этой области, а с другой — отражает наше понимание моделей этого класса. Итак, АОМ — это модель, обладающая следующими основными свойствами:

1. **Автономия.** Агенты действуют независимо друг от друга и при этом предполагается, что в моделях нет единой регулирующей структуры, которая контролировала бы поведение каждого агента в отдельности. Однако при этом взаимодействие микро- и макроуровней в моделях осуществляется, как правило, следующим образом: на макроуровне задается общий для всех агентов набор правил, и, в свою очередь, совокупность действий агентов микроуровня может оказывать влияние на параметры макроуровня.
2. **Неоднородность.** Агенты чем-то различаются друг от друга, что принципиально отличает АОМ от широко распространенных моделей с агентом-представителем, причем различия между агентами могут проявляться по многим параметрам (в случае агентов, отображающих людей, это могут быть параметры уровня здоровья, дохода, культурного уровня, а также правил принятия решений и т. д.).
3. **Ограниченная интеллектуальность агентов** (или ограниченная рациональность). Иными словами, агенты модели не могут познать нечто большее, выходящее за рамки макросреды модели.
4. **Расположение в пространстве.** Имеется в виду некоторая «среда обитания», которая может быть представлена как в виде решетки (как в игре «Жизнь», см. ниже), так и в виде гораздо более сложной структуры (скажем, трехмерного пространства с заданными в нем объектами).

Помимо перечисленного, общей особенностью всех АОМ и одновременно с этим их главным отличием от моделей других классов является наличие в них большого числа взаимодействующих друг с другом агентов (так, существуют АОМ, число агентов в которых достигает нескольких миллионов; см., напр., модель, разработанную под руководством Дж. Эпштейна [4]). Обычно в моделях социально-экономических систем присутствуют агрегированные агенты, представляющие

собой либо отрасль, либо регион, либо совокупное домохозяйство. При этом спецификация агента происходит за счет оптимизации соответствующей функции полезности или же в модель включаются рассчитанные ранее экзогенные параметры, отражающие результаты решений агента. В литературе эти два подхода часто подвергаются обоснованной критике, поскольку в большинстве случаев они не всегда позволяют получить в рамках таких моделей реалистичные оценки взаимодействия агрегированных агентов. В то же время за счет более детальной спецификации в АОМ агентов микроуровня можно добиться изменений параметров макроуровня, более адекватных действительности.

Подытоживая отметим, что согласно перечисленным свойствам агент в АОМ является автономной сущностью, как правило, имеющей графическое представление, с определенной целью функционирования и возможностью обучения в процессе существования

до определенного уровня, определяемого разработчиками соответствующей модели. Примерами агентов могут быть: 1) люди (равно как и другие живые организмы), роботы, автомобили и другие подвижные объекты; 2) недвижимые объекты, а также 3) совокупности однотипных объектов. Вообще говоря, агентами в АОМ могут быть любые наблюдаемые в реальной жизни объекты, однако основной задачей их учета в рамках модели является их корректная спецификация.

## 2. Что может быть «внутри» агента?

Как правило, для описания агента используются параметры, переменные, функции, поведенческие диаграммы, представляющие собой, к примеру, схемы UML (Unified Modeling Language), отражающие состояния агентов в определенный момент времени.

Агенты, имеющие графическое представление, могут перемещаться в рамках:

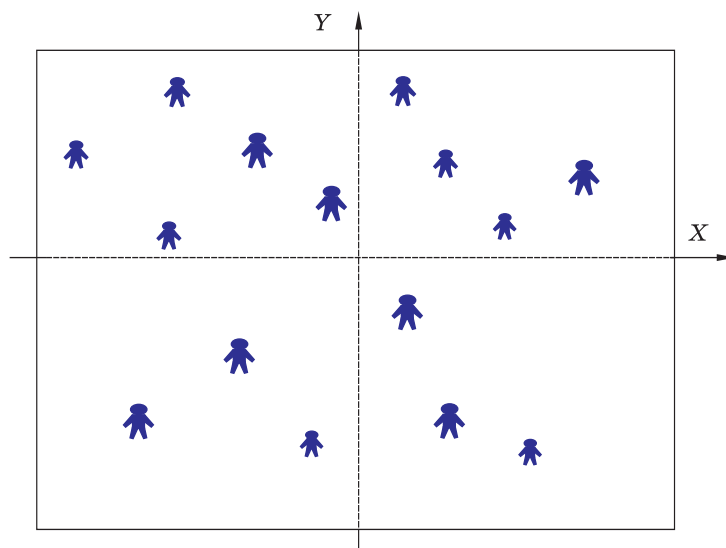


Рис. 1. Агенты в евклидовом 2D пространстве



Рис. 2. Агенты в ГИС

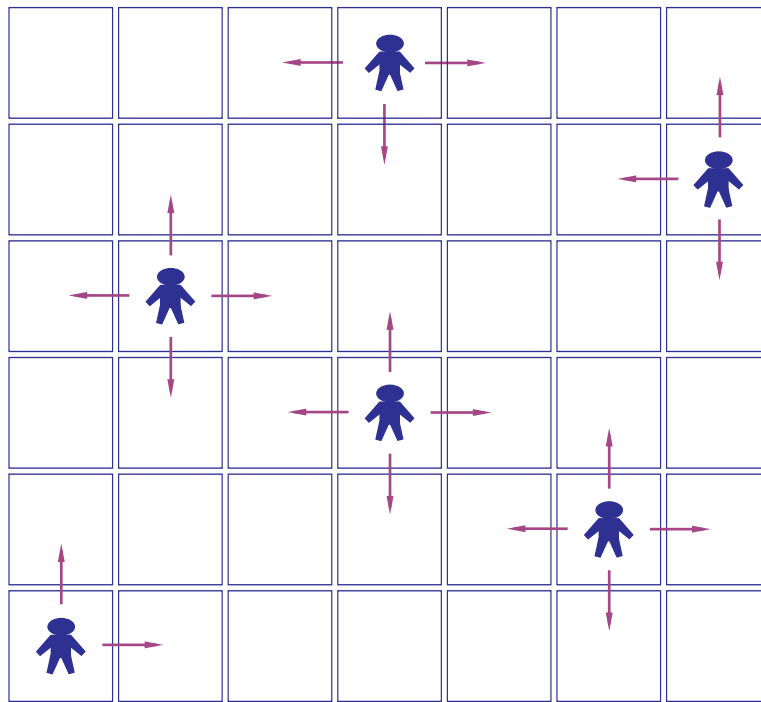


Рис. 3. Решетка — среда для перемещения агентов

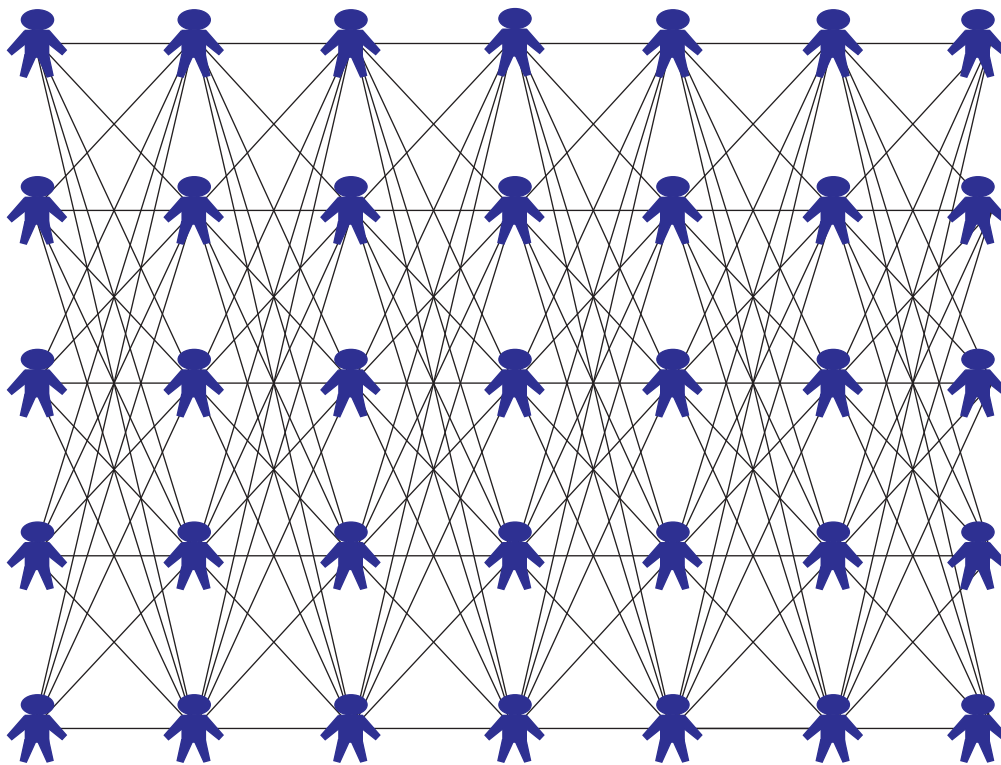


Рис. 4. Взаимодействие агентов в рамках некоторой сетевой структуры

- евклидова пространства (2D или 3D, рис. 1);
- ГИС (геоинформационной системы или системы, позволяющей создавать базы данных, сочетающие в себе графическое и атрибутивное представление разнородной информации, рис. 2);
- решетки (в этом случае перемещение агентов происходит строго из одной ячейки в другую, рис. 3);
- сетевой структуры (рис. 4).

Тем не менее иногда для АОМ непосредственного отображения анимации агентов не требуется, и в этом случае моделируется их взаимодействие без учета их пространственного расположения.

### 3. Краткая история возникновения АОМ

Концептуальный прототип первой АОМ был разработан в конце 1940-х гг. Однако широкое распространение эти модели получили в начале 1990-х гг., благодаря появлению микрокомпьютеров и возможности проводить компьютерные симуляции.

Принято считать, что АОМ берут свое начало с вычислительных машин Джона фон Неймана, являющихся теоретическими машинами, способными к самовоспроизводству [5].

Джон фон Нейман предложил использовать машины, которые следуют детальным инструкциям, для

создания точных копий самих себя. Впоследствии данный подход был усовершенствован другом фон Неймана, Станиславом Уламом, который предложил изображать машину на бумаге в качестве набора клеток на решетке [6]. Данный подход стал началом развития клеточных автоматов.

Наиболее известной реализацией взаимодействия конечных автоматов стала игра «Жизнь», предложенная Джоном Хортоном Конвеем (John Horton Conway), отличающаяся от машины фон Неймана достаточно простыми правилами поведения агентов [7].

Одновременно с этим возникло новое научное направление — компьютерное имитационное моделирование, которое в настоящее время включает следующие основные направления: 1) системная динамика (СД); 2) дискретно-событийное моделирование (ДС) и 3) агентное моделирование.

Все эти виды моделирования применяются в том числе для решения социальных и экономических задач на разных уровнях абстракции. Агентное моделирование, развитие которого напрямую определяется увеличивающимися вычислительными возможностями современных компьютеров, позволяет представить (смоделировать) систему практически любой сложности из большого количества взаимодействующих объектов, не прибегая к их агрегированию. Появились программные средства (см. ниже), позволяющие сочетать все вышеперечисленные направления имитационного моделирования.

Однако наибольшие трудности возникают при совмещении объектов разного уровня абстракции в рамках одной модели. В этой связи разработчики математических моделей социально-экономических систем все чаще ставят вопрос об актуальности проблем построения иерархических динамических моделей, включающих в себя субъектов макроуровня и агентов микроуровня, поведение которых должно быть описано более реалистично, нежели применяемые на

практике методы их представления. АОМ позволяют совмещать в себе агентов различного уровня абстракции, и даже более того — практически любая модель, основанная на двух других парадигмах имитационного моделирования (СД и ДС), может быть легко конвертирована в АОМ и уже в таком качестве использовать преимущества агентного подхода.

На рис. 5 в виде схемы отображено соотношение различных подходов к моделированию объектов различной степени детализации. Как видно, СД в основном используется для решения задач на высоком уровне абстракции; в свою очередь, модели ДС используются на низком и среднем уровнях и, как уже говорилось, АМ применимо на всех уровнях [8]. Отметим, что к высокому уровню абстракции относятся, к примеру, задачи прогнозирования динамики населения страны; на низком уровне реализуются микроуровневые модели (например, модели движения пешеходов); наконец, к среднему уровню относятся задачи, связанные, к примеру, с оптимальным планированием перевозок внутри региона и т. п.

С середины 1990-х гг. АОМ стали использоваться для решения множества коммерческих и технологических задач, например, таких как:

- оптимизация сети поставщиков и планирование перевозок;
- планирование развития производства;
- прогнозирование спроса на продукцию и объема продаж;
- оптимизация численности персонала;
- прогнозирование развития социально-экономических систем (городов, регионов);
- моделирование миграционных процессов;
- имитация и оптимизация пешеходного движения;
- моделирование транспортных систем;
- прогнозирование экологического состояния окружающей среды и т. д.

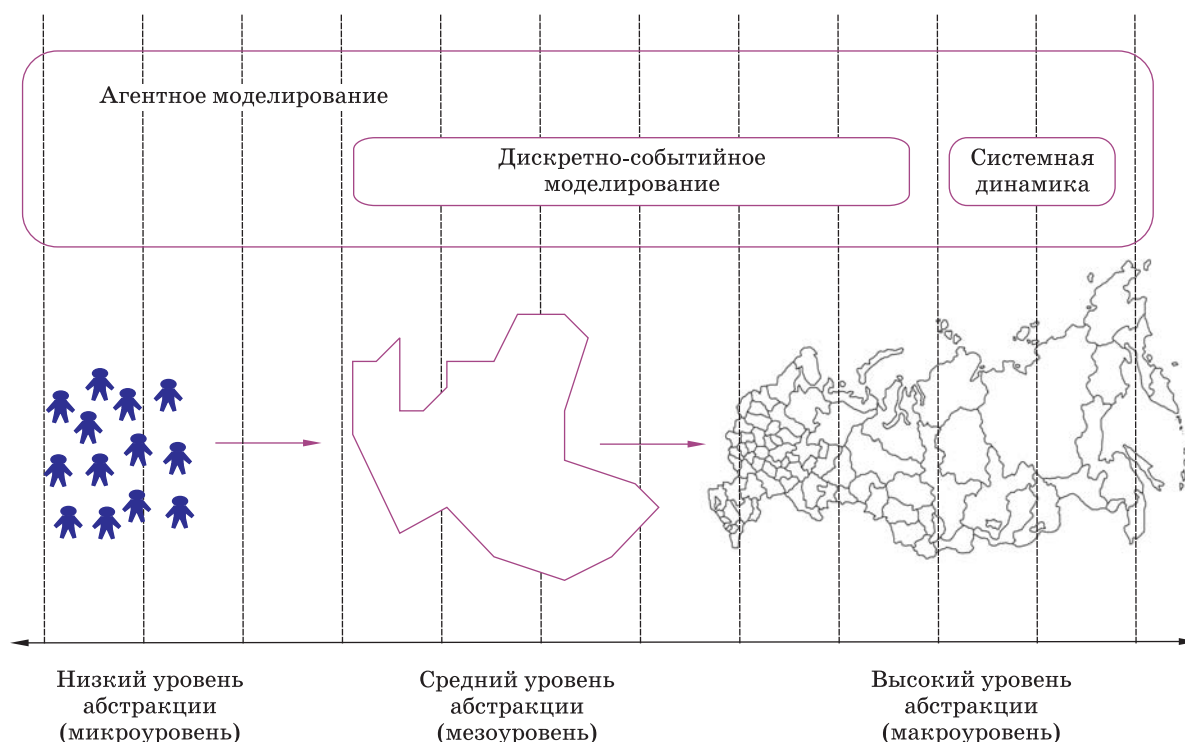


Рис. 5. Соотношение основных подходов к имитационному моделированию различных объектов и трех уровней абстракции

#### 4. Преимущества АОМ

Преимущества АОМ перед другими средствами имитационного моделирования заключаются в следующем.

- 1) АОМ позволяют смоделировать систему, максимально приближенную к реальности. Как уже говорилось, степень детализации АОМ, по сути, ограничивается только возможностями компьютеров. Более того, в ряде АОМ передвижение агентов задается без использования сложных формул, но с помощью заранее определенных маршрутов и простых правил, с одной стороны, имитирующих адаптивное мышление в процессе принятия решений, а с другой — позволяющих получить неочевидные результаты на уровне агрегированных параметров. Примерами таких АОМ могут быть модели, имитирующие передвижение пешеходов, покупателей в крупных торговых центрах, спецтехники на складах и т. д.
- 2) АОМ обладают свойством *эмерджентности*. К примеру, в одной из описываемых ниже моделей имитируется работа транспортной системы г. Москвы, при моделировании которой мы определяли поведение только отдельных агентов, в то время как более общие явления — автомобильные пробки или параметр, отражающий уровень загруженности дорог города, определялись уже в процессе работы модели.
- 3) Как следует из предыдущего пункта, важным преимуществом агентного моделирования является возможность построения моделей с учетом отсутствия знаний о глобальных зависимостях в рамках моделирования соответствующей предметной области. Важно представлять логику поведения отдельных агентов, что, в свою очередь, может помочь в получении более общих знаний об изучаемом процессе.
- 4) АОМ является гибким инструментом, позволяющим легко добавлять и удалять агентов в модели, а также менять параметры и правила их поведения [2].

Считается, что агентное моделирование дополняет традиционные аналитические методы, а также ограничительно включает в себя упомянутые выше подходы имитационного моделирования, поскольку последние могут применяться «внутри» агентной модели при формализации ее отдельных активных объектов или агентов [9]. Появление АОМ можно рассматривать как результат эволюции методологии моделирования: переход от мономоделей (одна модель — один алгоритм) к мультимоделям (одна модель — множество независимых алгоритмов).

АОМ могут объяснить причину возникновения таких явлений, как террористические организации, войны, обрушение рынка акций и т. д. В идеале АОМ могут помочь идентифицировать критические моменты времени, после наступления которых чрезвычайные последствия будут иметь необратимый характер.

#### 5. Известные примеры АОМ

Описание известных АОМ начнем с модели, давно ставшей классической, — с игры «Жизнь», о которой уже упоминалось выше.

Игра «Жизнь» демонстрирует интересное эмерджентное поведение при взаимодействии элементов популяции (закрашенных клеток), т. е. такое поведение, при котором дальнейшее развитие популяции представляет собой скачкообразный процесс, где

возникновение качественно нового является не естественной закономерностью, а обусловлено вмешательством «идеальных сил».

Состояние конечного автомата в момент  $t + 1$  является функцией от его собственного состояния и состояния его соседей в момент времени  $t$ .

Благодаря взаимодействию каждого элемента клеточного автомата со всеми соседями достигается гораздо более разнообразное поведение, чем поведение отдельного автомата. Такая взаимозависимость является одним из наиболее привлекательных свойств клеточных структур. Поскольку выход каждого элемента зависит от состояния его соседей, эволюцию состояний набора элементов можно описать как процесс социальной адаптации.

Благодаря своей способности обеспечивать разнообразное коллективное поведение в процессе взаимодействия простых клеток клеточные сообщества стали мощным средством изучения математических принципов эмерджентности жизни на основе простых неодушевленных компонентов.

Итак, игра «Жизнь» — одно из средств понимания мира на основе взаимодействия и движения.

Ниже приведены три правила игры «Жизнь».

1. Если для некоторой клетки (занятой или свободной) ровно три ближайшие клетки заняты, то она будет занята в следующий момент времени (рис. 6).
2. Если для некоторой занятой клетки заняты также ровно две соседние клетки, то она будет занята в следующий момент времени (рис. 7).
3. Во всех остальных ситуациях в следующий момент времени клетка остается свободной (т. е. слишком плотная населенность или, наоборот, разреженность приводят к невозможности жизни).

Интересно, что эта достаточно простая модель породила огромное количество литературы, посвященной исследованию различных состояний или структур (patterns) в игре «Жизнь». Так, в работе [10] описано большое разнообразие структур, получаемых в процессе работы модели. Ниже перечислены некоторые из них.

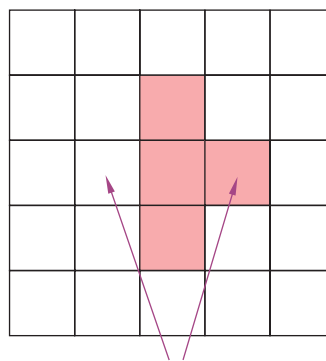


Рис. 6. Занятая или свободная клетка

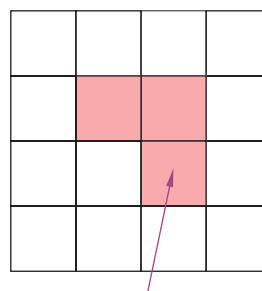


Рис. 7. Занятая клетка

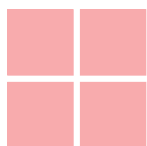


Рис. 8. Структура block

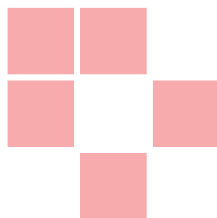


Рис. 9. Структура boat



Рис. 10. Структура blinker



Рис. 11. Структура toad

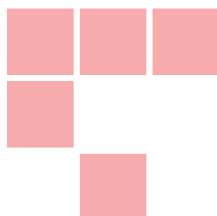


Рис. 12. Структура glider

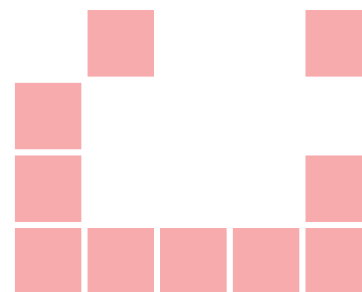


Рис. 13. Структура lightweight spaceship

1. Неизменяемые формы жизни — структуры block и boat, которые в следующие моменты времени остаются неизменными (рис. 8 и 9).
2. Осцилляторы (или переключатели) — структуры blinker и toad (рис. 10 и 11).
3. Перемещающиеся структуры (планеры, которые перемещаются по всей игровой площадке) — glider и lightweight spaceship (рис. 12 и 13).

Но это далеко не все, поскольку были вычислены разнообразные структуры, которые:

- поглощают в процессе игры другие структуры;
- интересным образом трансформируются и т. д. Другой не менее известной АОМ является *сахарная модель* (SugarScape), предложенная Джошуа Эпштейном и Робертом Экстеллом [11].

Пространство для взаимодействия агентов задано в виде двумерной решетки, в каждой клетке которой находится некоторое количество сахара, изменяемое в следующий момент времени. Как правило, сахар распределен по пространству не равномерно, а в виде скоплений (обычно в правом верхнем и левом нижнем углах). Количество сахара восстанавливается с регулируемым пользователем темпом.

Поведение и атрибуты агентов модели задаются следующими правилами.

- Для каждого агента задается количество сахара, которое он должен потребить в единицу времени.
- У каждого агента имеется запас сахара, который он может переносить с собой из клетки в клетку (переменная величина, поскольку в случае отсутствия сахара в ячейке агент расходует запас).
- Агент может «видеть» и соответственно перемещаться в соседние клетки, причем «горизонт видимости» ограничен ближайшими семью ячейками (в случае если агент находится не на границе игрового поля).
- В процессе работы модели агент осматривает доступные для видения клетки и выбирает незанятую с наибольшим количеством сахара. После занятия соответствующей клетки агент забирает весь имеющийся в ней сахар. Таким образом, общее количество сахара агента складывается из запасов, а также полученного в новой клетке сахара за вычетом потребленного в текущем периоде.

- Агент погибает в том случае, если кончился запас сахара, в текущей ячейке нет сахара и текущие потребности нечем восполнить.

Существуют различные модификации сахарной модели, к примеру разделение агентов на «мужчин» и «женщин» или добавление нового продукта — сахарного сиропа. Также есть модификации с возможностью торговли между агентами и с усложненными правилами движения агентов.

Помимо названных моделей существует достаточно большое количество АОМ, схожих с описанными выше и в каком-то смысле являющихся их клонами (с незначительными вариациями).

В этой связи мы не будем заострять на них внимание, а просто кратко опишем наиболее известные:

- *Модель распространения инфекции.* В двумерном пространстве задается совокупность людей, разделенных на три группы: 1) потенциально инфицированные, но пока здоровые; 2) инфицированные и 3) здоровые и уже обладающие иммунитетом. Люди могут умереть либо от болезни, либо от старости. В процессе работы модели они перемещаются в пространстве и вступают друг с другом в контакт. Изменяя количество здорового и инфицированного населения, способ перемещения людей, возрастной порог, вероятность смерти от инфекции и прочие параметры, можно моделировать скорость распространения инфекции и определять ситуации, при которых рассматриваемому социуму удастся полностью победить болезнь [12, 13].
- *Модель сегрегации Шеллинга* [14].
- *Тепловые жуки (Heat Bugs)* [15].

Несомненно, что подобные технологии привлекли внимание военных (к примеру, военно-научное агентство DAPRA, являющееся крупнейшим инвестором проектов в области искусственного интеллекта и робототехники). При разработке современного оружия сейчас активно используются системы искусственного интеллекта (в основном нейронные технологии и нечеткие экспертные системы). Например, реализация режима автономного полета на небольшой высоте и в плохих условиях без использования заранее подготовленной компьютерной базы рельефа требует применения высокоэффективных механизмов синхрони-

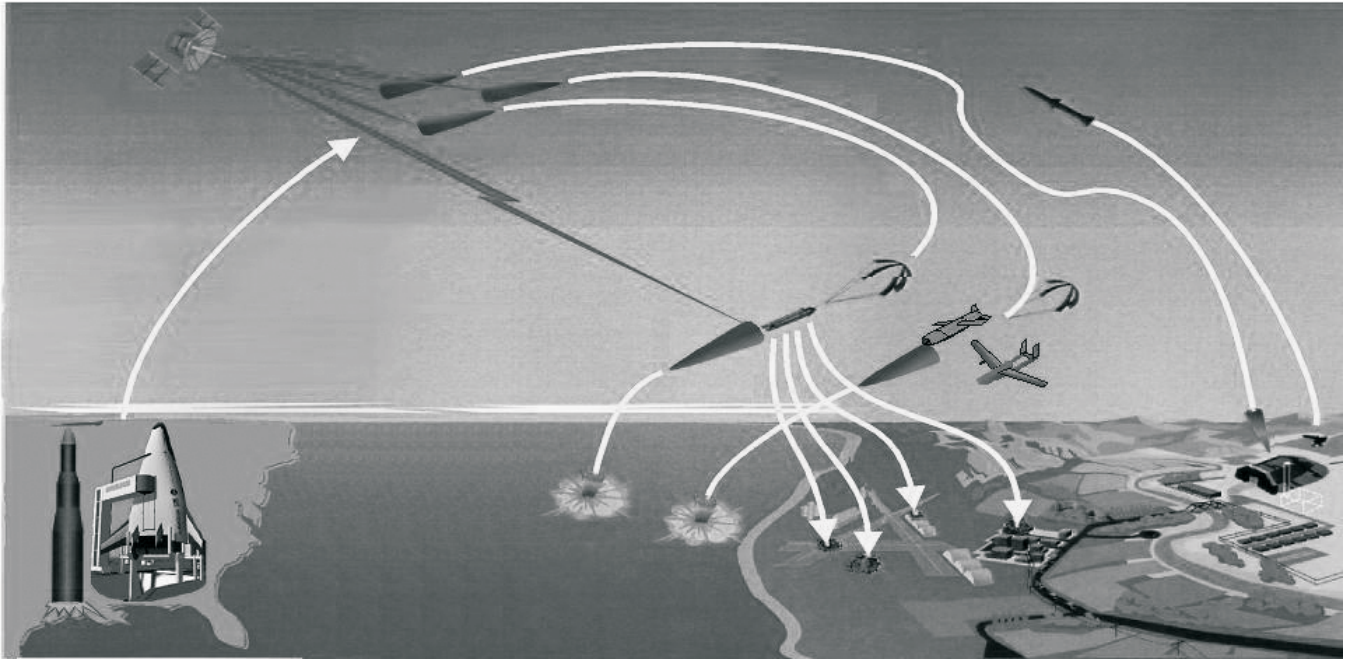


Рис. 14. Концептуальный взгляд на работу системы SEAS (скриншот с презентации разработчика)

зации движения с данными, получаемыми от систем навигации, видеокамер, радаров и других датчиков. Использование искусственного интеллекта позволяет с помощью относительно малых ресурсов получать достаточно точные результаты, для вычисления которых классическими методами численной математики понадобилось бы использование суперкомпьютеров [16].

То же относится и к АОМ. К сожалению, имеющиеся разработки военных по данной тематике являются закрытыми, что вполне естественно. Однако нам удалось найти некоторый материал, позволяющий составить представление о проводимых исследованиях.

В США уже более 10 лет идет финансирование разработки системы анализа эффективности симуляций (The System Effectiveness Analysis Simulation, SEAS) — инструмента, позволяющего моделировать военные операции и проигрывать различные варианты боевых действий с целью нахождения наиболее эффективной стратегии для заданной местности с учетом имеющегося арсенала и количества боевых единиц (рис. 14).

Финансирование этого проекта осуществляется Командованием воздушных сил США (Air force space command), Центром космических и ракетных систем (Space and missile systems center), Управлением планирования развития (Directorate of Developmental Planning).

По заверениям разработчиков, SEAS представляет собой самую современную систему, использующую технологию АОМ, для отработки сценариев как крупномасштабных военных столкновений, так и локальных конфликтов, а специально разработанный 3D-интерфейс позволяет участвовать в процессе обсуждения рассматриваемых вариантов боевых действий экспертам из различных областей — непрофессионалам в области построения АОМ.

Среда моделирования позволяет оперировать как базовыми параметрами (ландшафтом местности, количеством основных боевых единиц: пехотой, самолетами, танками и другой техникой), так и дополнительно введенными переменными. Таким образом, можно расположить на местности смешанные боевые соединения, пункты снабжения топливом и продовольствием

со стороны всех воюющих сторон, задать боевые способности каждого вида вооружения (поражающие способности, силу брони и т. д.) и получить предположительные результаты боя (рис. 15).

Имея такие данные и выслушав мнения экспертов относительно возможных итогов предстоящего конфликта, принимающее решение лицо может отказаться от боевых действий или, наоборот, стянуть дополнительные силы.

Учитывая развитие компьютерной техники, есть основания предполагать, что данная АОМ, разработанная для военных целей, далеко не единственная, но по понятным причинам подобного рода разработки носят закрытый характер. Что касается описываемой АОМ, то она хотя и носит открытый характер (т. е. может быть выслана по запросу), но, по всей видимости, в ее доступности есть особый смысл. Так, разработчики системы активно призывают к сотрудничеству, начиная с главной страницы сайта: «Have an idea for a new feature you'd like to see in SEAS?». Вполне может быть, что наиболее удачные идеи со стороны сторонних разработчиков находят применение уже в закрытых для общественности программных продуктах в этой области.

Как бы там ни было, но уже сейчас можно констатировать факт принятия военными упомянутых выше средств моделирования поведения человека и общества в целом, а именно систем искусственного интеллекта и АОМ.

\* \* \*

Большинство разработанных АОМ выложены в свободном доступе в Интернете (на страницах ученых-разработчиков или на популярных порталах, содержащих информацию по данной проблематике). Так, существуют специализированные издания, тематика которых напрямую связана с разработкой АОМ, например, онлайн-журнал JASSS (Journal of Artificial Societies and Social Simulation, <http://jasss.soc.surrey.ac.uk/JASSS.html>), ставший уже достаточно известным. Отметим также российский ежеквартальный интернет-журнал «Искусственные общества» ([www.artsoc.ru](http://www.artsoc.ru)).

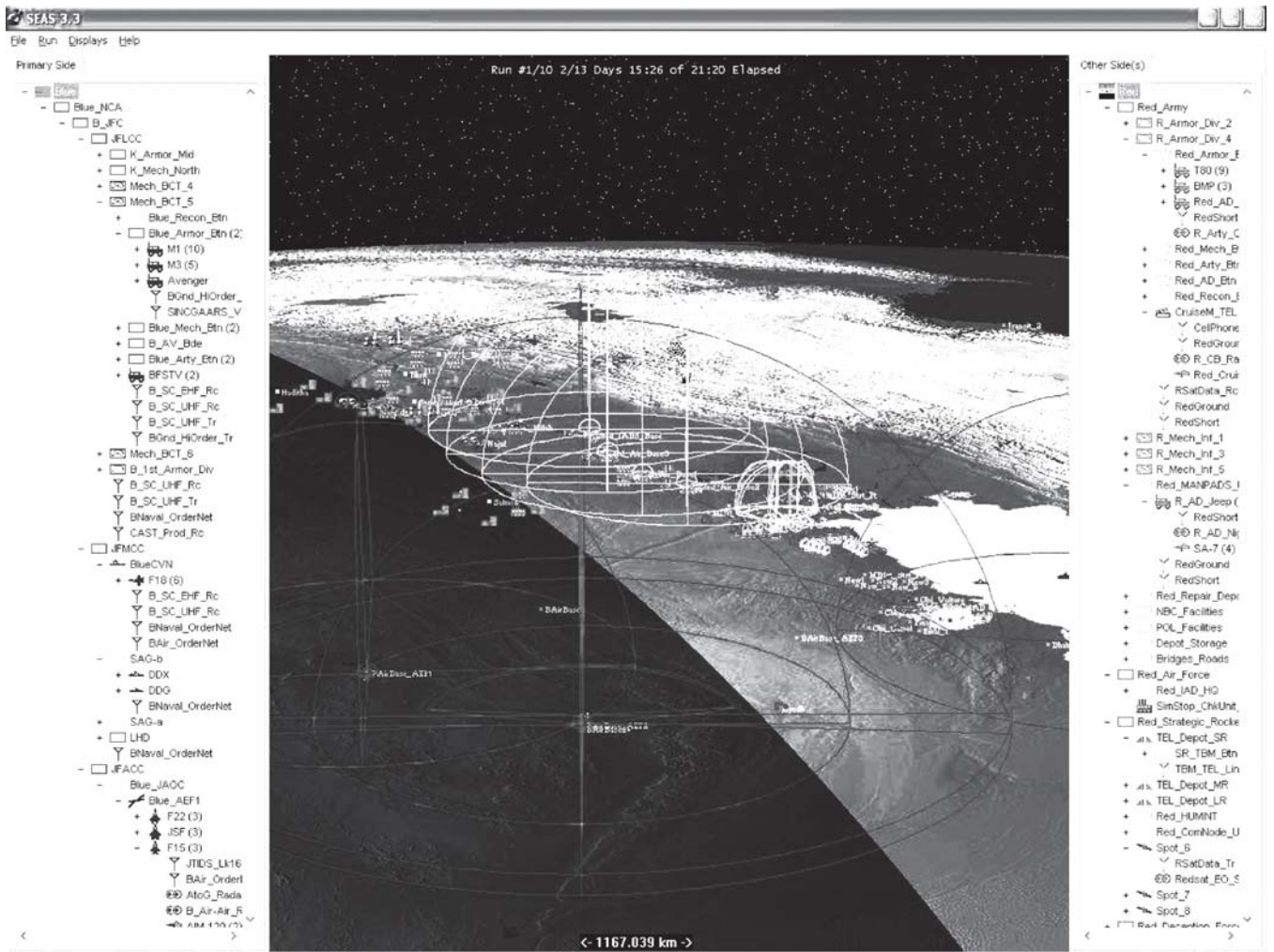


Рис. 15. Рабочее окно системы SEAS: моделирование боевых действий — предварительная расстановка сил

Также следует упомянуть про новое направление в прикладной экономике — агент-ориентированной экономике (Agent based Computational Economics, ACE), основой которой является моделирование виртуального мира, «населенного» автономными агентами (экономическими, биологическими и т. д.). В проект по созданию подобных миров вовлечено много исследователей, разработки которых выложены на сайте [www.econ.iastate.edu/tesfatsi](http://www.econ.iastate.edu/tesfatsi). Управление созданным виртуальным миром в соответствии с методологией ACE осуществляется без вмешательства извне, т. е. только посредством взаимодействия агентов [17]. При этом агенты должны обладать способностью к обучению.

## 6. Программное обеспечение для реализации АОМ

В этом разделе мы перечислим наиболее известное программное обеспечение для построения АОМ.

Вообще говоря, разработка АОМ не требует использования специализированных программ, т. е. в принципе можно применять средства разработки широкого профиля (C#, Delphi и т. д.), однако специализированные программы содержат набор готовых библиотек для представления агентов и их среды. Иными словами, такие операции, как визуализация двумерной решетки, перемещение агентов по ней, значительно упрощены, и в этой связи предпочтительнее использовать имеющийся арсенал описываемых ниже средств.

1. **SWARM**. Наиболее популярным прикладным пакетом для моделирования параллельно распределенного виртуального мира является универсальный пакет SWARM, разработанный в Институте Санта-Фе (Santa Fe Institute, USA). По своей сути SWARM является набором библиотек, написанных на языке Objective-C, служащих основой для разработок сложных мультиагентных систем. Этот пакет в свободном доступе выложен в сети по адресу: <http://www.swarm.org>.

Разработка виртуального мира в SWARM осуществляется в два основных этапа:

- создание среды виртуального мира, в которой будут сосуществовать агенты, определяемые на следующем этапе;
- создание агентов — объектов виртуального мира (к примеру, людей) с описанием их атрибутов и правил взаимодействий. В процессе своего существования созданные агенты будут анализировать получаемые от окружающей среды данные, реагировать на них и пополнять свой опыт (обучаться). Этот этап разработки модели наиболее важен, поскольку агенты, корректно отражающие черты своего реального прообраза, — залог адекватно построенного виртуального мира.

Более подробно про пакет SWARM можно узнать на официальном сайте (см. выше), из книги «Economic simulation in SWARM» [18], а также из русскоязычного источника [19].

2. **MASON** — программный продукт, разработанный в США (George Mason University), в нем реализованы наиболее известные агент-ориентированные модели:



Game of Life (игра «Жизнь»), SugarScape (сахарная модель) и т. д. Помимо этого, MASON предоставляет пользователю возможность реализовывать свои собственные модели, используя язык Java. Скачать MASON можно с сайта <http://cs.gmu.edu/~eclab/projects/mason/>.

3. *SOARS* — программный продукт, разработанный в Токийском технологическом институте, с простым интерфейсом, позволяющим даже новичкам довольно быстро начать разрабатывать агент-ориентированные модели. *SOARS* включает в себя 3 программных модуля:

- 1) Visual shell,
- 2) Model builder,
- 3) Animator.

Эти модули предоставляют пользователю все необходимые для работы библиотеки. Кроме того, в *SOARS* реализована возможность написания собственных программ на языке Java.

4. *ArtiSoc* — программный продукт, разработанный в Токийском университете (University of Tokyo), позволяет быстро и легко реализовывать агент-ориентированные модели. В ходе демонстрации на Первом мировом конгрессе по социальному моделированию (г. Киото, Япония) с помощью пакета *ArtiSoc* была построена известная модель Шеллинга (Schelling's segregation model). Более подробная информация и пакет *ArtiSoc* доступны по адресу: <http://citrus.c.u-tokyo.ac.jp/mas/english/index.htm>.

5. Простой и доступной программой для разработки АОМ является бесплатно распространяемое приложение *NetLogo*. Изначально *NetLogo* был разработан как учебный инструмент, однако сейчас им пользуются не

только студенты, но и тысячи исследователей. Это программа часто применяется в вузах для обучения студентов основам АОМ. Схожей функциональностью обладает программа *StarLogo*.

Также следует отметить пакеты для разработки АОМ *Repast*, *EcoLab* и *Cormas*, однако больших отличий от предыдущих средств разработки АОМ у них нет.

6. Отдельно стоит рассказать про пакет *AnyLogic*. Данный пакет является продуктом нового поколения для разработки и исследования имитационных моделей, причем он является единственным российским профессиональным инструментом имитационного моделирования, успешно конкурирующим с зарубежными аналогами.

В отличие от перечисленных выше пакетов для построения АОМ *AnyLogic* является коммерческим продуктом, и в этой связи он лишен многих недостатков, присущих open source продуктам, ответственность за которые их разработчики снимают с себя в силу бесплатного распространения.

*AnyLogic* поддерживает различные подходы к моделированию, в том числе и агентный, для которого содержит специальную библиотеку классов *AnyLogic agent based library*, предоставляющую возможность задания требуемой функциональности у агентов модели. Следует также отметить, что *AnyLogic* поддерживает все возможные способы задания поведения агентов — диаграммы состояний (стейтчарты), синхронное и асинхронное планирование событий.

На приведенном рисунке представлена АОМ, в которой имитируется процесс работы одного из терминалов крупного аэропорта (рис. 16). Как видно, пакет

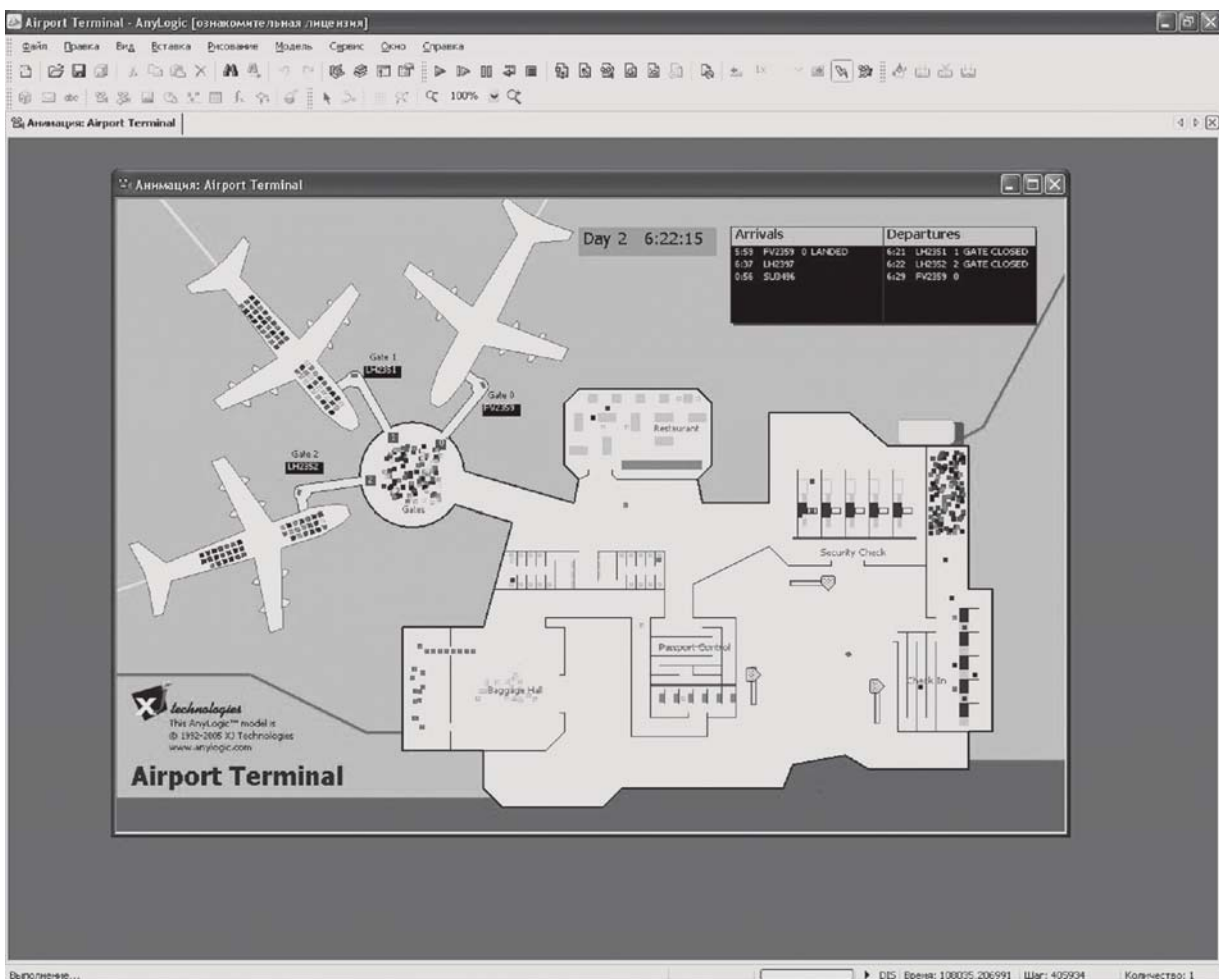


Рис. 16. Реализация работы терминала в аэропорту с помощью пакета AnyLogic

AnyLogic обладает хорошими средствами визуализации и позволяет имитировать различные процессы, происходящие в производстве, бизнесе и т. д.

Более подробно про саму среду разработки AnyLogic и некоторые теоретические аспекты имитационного моделирования можно прочитать в книге Ю. Г. Карпова [20].

## 7. АОМ, разработанные в ЦЭМИ РАН

В ЦЭМИ РАН имеется большой опыт по разработке АОМ. Так, наиболее известными являются: АОМ автомобильных пробок в г. Москве, АОМ рынка авиаперевозок в московском авиационном узле и АОМ воспроизводства научного потенциала России. Ниже приведены краткие описания двух из них.

### 7.1. АОМ автомобильных пробок г. Москвы

Разработанная модель позволяет решать задачи масштаба городской агломерации, связанные с оценкой работы всей транспортной системы в результате изменения следующих ее элементов:

- введение новых радиальных или кольцевых автомагистралей;
- строительство новых жилых районов или ввод в эксплуатацию объектов, концентрирующих вокруг себя транспортные потоки (к примеру, это может быть крупный торговый центр);
- временное закрытие или ликвидация какого-либо элемента транспортной системы;
- введение экономических санкций (плата за проезд по магистрали, за въезд в зону центра и т. п.).

#### Технические аспекты модели.

В модели три типа агентов: 1) агент (человек), который хочет добраться из пункта А в пункт В; 2) легко-

вой автомобиль, перевозящий в среднем 2 человек; 3) общественный транспорт, перевозящий примерно 150 человек.

Агенты первого типа принимают решение о выборе транспортного средства (т. е. о выборе агента второго или третьего типа) исходя из ряда факторов, речь о которых пойдет ниже. Агенты второго и третьего типа имеют привязку к анимационной диаграмме, меняющейся в режиме реального времени, а их отображение (т. е. скорость перемещения и местоположение в момент времени  $t$ ) зависит от конкретной ситуации. Два основных фактора, влияющих на выбор типа транспортного средства, имеют различную природу: экономическую и психологическую. Психологический фактор подразумевает комфорт, получаемый от поездки на личном автомобиле, который до определенного момента перевешивает дискомфорт от возрастающих затрат. Влияние экономического фактора осуществляется через эмпирически полученную функцию, где зависимой переменной является вероятность выбора личного транспорта в качестве средства передвижения до пункта назначения, а независимой — доля расходов на личный автотранспорт в общем объеме расходов. Таким образом, агент первого типа, имея информацию о предстоящих расходах, выбирает тот или иной способ передвижения по городу.

Анимационная диаграмма представляет собой карту города, детализированную до уровня крупных транспортных магистралей (рис. 17).

Карта города представлена в виде рисунка, поверх которого наложена транспортная сеть, а ее элементы представляют собой экземпляры соответствующих Java-классов. В зависимости от количества транспортных единиц, задействованных в текущий момент времени, меняется скорость их передвижения, а также могут возникать автомобильные пробки в местах

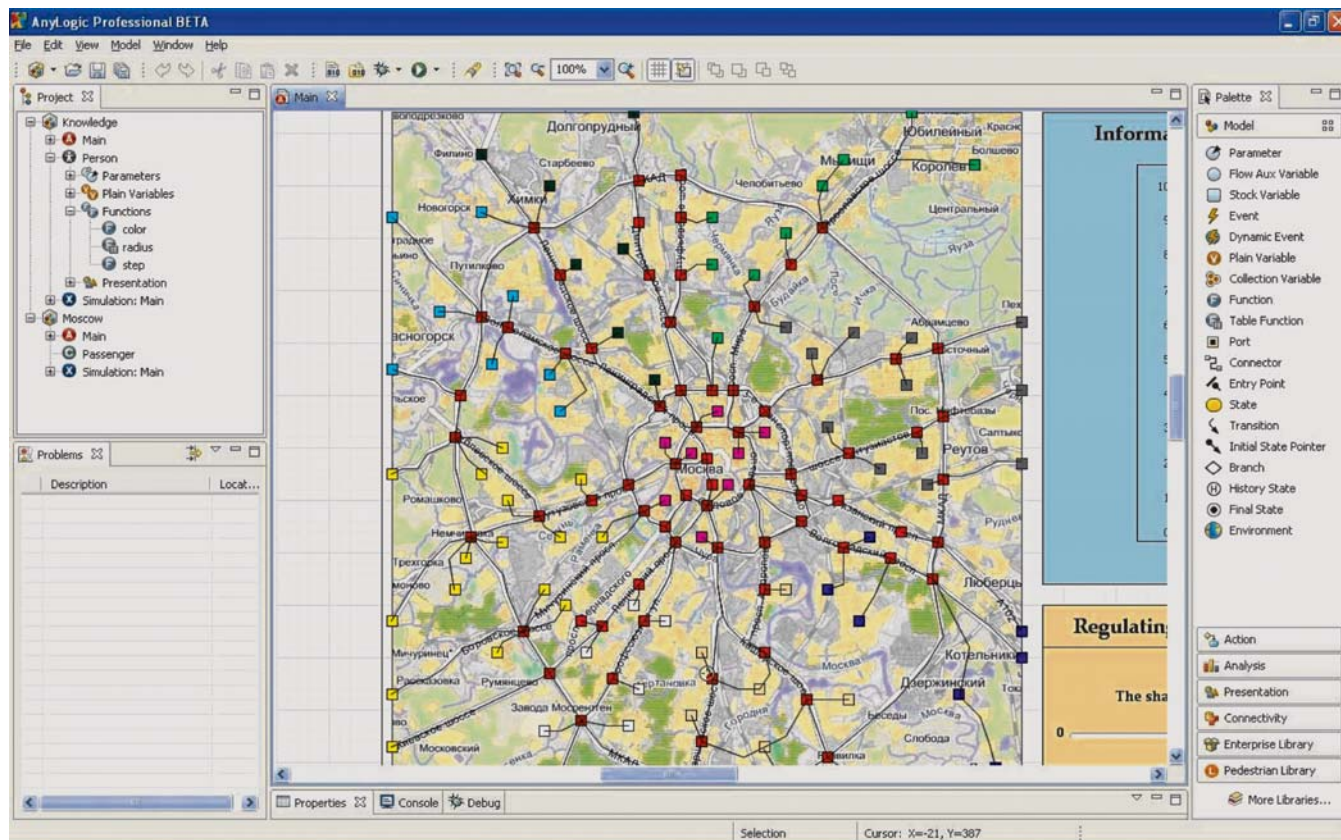


Рис. 17. Реализация транспортной сети г. Москвы в АОМ

пересечения наиболее оживленных транспортных магистралей. Запрограммированная транспортная сеть состоит из узлов (конечных и начальных маршрутов для агентов первого типа; на рис. 17 это *квадратики*), а также путей для передвижения агентов второго и третьего типов. Для большей реалистичности в программе предусмотрено, что двигающиеся агенты должны выдерживать дистанцию между собой. Для обозначенных агентов предусмотрено, что расстояние между их анимационными отображениями не может быть меньше определенной дистанции, но может быть больше. Собственно в компьютерном приложении эта особенность поведения агентов представляет наибольшую сложность для программной реализации. Той же точки зрения придерживаются D. Helbing [21] и H. Duguchi [22].

#### Обработка данных для модели

Количество агентов первого типа задается согласно статистическим данным о численности населения в районах города.

Для оценки межрайонных корреспонденций используется *гравитационная модель*, основанная на предположении о том, что корреспонденция из одного района в другой тем больше, чем больше емкости районов прибытия и отправления и чем ближе друг к другу расположены эти районы.

Для построения матрицы межрайонных корреспонденций потребовались следующие данные:

- емкости районов по отправлению (в рамках модели это трудоспособное население, которое в рабочие дни добирается до работы);
- емкости районов по количеству рабочих мест;
- затраты на передвижения из каждого рассматриваемого в модели района во все остальные районы города, измеряемые в километрах.

Всего в модели было рассмотрено 8 укрупненных районов — административных округов: (1) южный (ЮАО); (2) юго-восточный (ЮВАО); (3) юго-западный (ЮЗАО); (4) восточный (ВАО); (5) западный (ЗАО); (6) северный (САО); (7) северо-западный (СЗАО); (8) северо-восточный (СВАО); (9) центральный (ЦАО).

С помощью разработанной модели была произведена оценка загруженности дорог города от гипотетического строительства новых дорог с различной геометрией (т. е. новые кольцевые или радиальные дороги). В результате выяснилось, что для г. Москвы строительство дополнительных радиальных дорог по сравнению с дополнительной кольцевой (при этом для тех и других дорог была предусмотрена одинаковая длина) является более эффективной мерой для борьбы с пробками. Таким образом, применение АОМ, построенной с учетом особенностей поведения отдельных граждан, позволяет наблюдать изменение дорожной ситуации в городе исходя из различных сценариев, что было бы затруднительно сделать, рассматривая только агрегированные показатели в виде наибольшего набора уравнений. Более подробно про модель и результаты работы с ней можно прочитать в статье «Регулирование транспортных потоков в городе — проблемы и решения» [23].

#### 7.2. АОМ воспроизводства научного потенциала России

В 2009 г. в ЦЭМИ РАН была разработана АОМ воспроизводства научного потенциала России на базе геоинформационной системы (ГИС).

По своей сути ГИС — это системы, позволяющие создавать базы данных, сочетающие в себе графиче-

ское и атрибутивное представление разнородной информации, а также обеспечивающие возможность пространственного анализа данных и представление его результатов в наиболее привычной для пользователей форме (в виде графиков, диаграмм, таблиц, карт и т. д.).

Общая схема построения АОМ на базе ГИС состоит из трех основных этапов.

- I. Прорисовка среды для функционирования агентов (например, карты страны).
- II. Для каждого элемента карты задаются свойства и методы, инициализируемые перед запуском модели с помощью соответствующих запросов к базе данных ГИС.
- III. Для каждого элемента карты создается определенное число экземпляров объектов типа «агент».

По указанной схеме была разработана АОМ распространения знаний. Ниже приведено ее концептуальное описание (в виде набора тезисов).

1. Жизненный цикл агента состоит из двух основных стадий (рождение и смерть) и промежуточных состояний, отслеживаемых на каждом шаге работы модели.
2. От момента рождения и до определенного возраста (по умолчанию — 18 лет) агент не участвует в процессе производства ВВП.
3. В течение жизни агент может стать либо обычным работником, либо ученым, либо «прикладником». Прослойка ученых создает базис для формирования прослойки «прикладников».
4. Становление ученого. По достижению работоспособного возраста агент с некоторой вероятностью может стать ученым. Если до 25 лет агент не становится ученым, то он не будет им никогда. Ученые не участвуют в создании ВВП, но в то же время:
  - производят знания, потребляемые «прикладниками», которые участвуют в процессе производства ВВП;
  - формируют среду, которая оказывает влияние на количество «прикладников».
5. Агент перестает быть ученым (или «прикладником») из-за низкой зарплаты (т. е. если заработная плата ученого (или «прикладника») заметно ниже, чем в социуме, то он уходит на работу в другие отрасли). Агент — бывший ученый (или «прикладник») может снова вернуться в науку (или на работу в инновационно-активные предприятия), если заработная плата в науке (или прикладной науке) станет выше, чем в среднем по социуму и если время отрыва от научной деятельности не превышает некоторого порога (по умолчанию — 5 лет).
6. Продолжительность жизни агента-ученого (и «прикладника») выше, чем у обычного человека (по умолчанию — на 10 лет). Однако в модели фактор продолжительности жизни не принимается в расчет при выборе профессии.
7. С задаваемой вероятностью (рассчитанной на основе российской статистики) агенты могут иметь ребенка. При этом ребенок агента-ученого (или «прикладника») становится ученым (или «прикладником») с большей вероятностью.
8. В модели предусмотрен экзогенный параметр — средняя зарплата высокоразвитых стран мира. Если в моделируемом социуме средняя зарплата (как у ученых, так и у представителей других профессий) становится намного ниже, чем в других странах, то ученый (или «прикладник») выбывает из социума навсегда (переезд в другую страну).

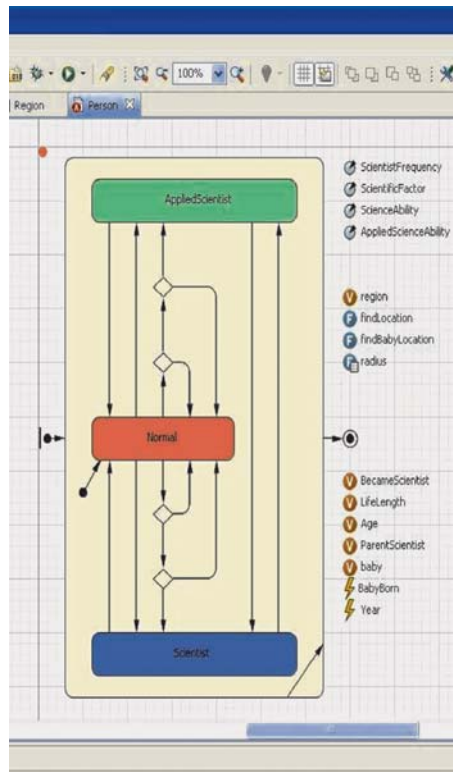


Рис. 18. Спецификация агентов в программной среде AnyLogic

С помощью разработанной модели можно рассчитать последствия от:

- увеличения заработной платы (всем типам работников),
- организации инновационных центров,

- дополнительных инвестиций в науку.
- Спецификация агентов модели осуществлялась с учетом следующих параметров (рис. 18):
- возраст,
  - продолжительность жизни,

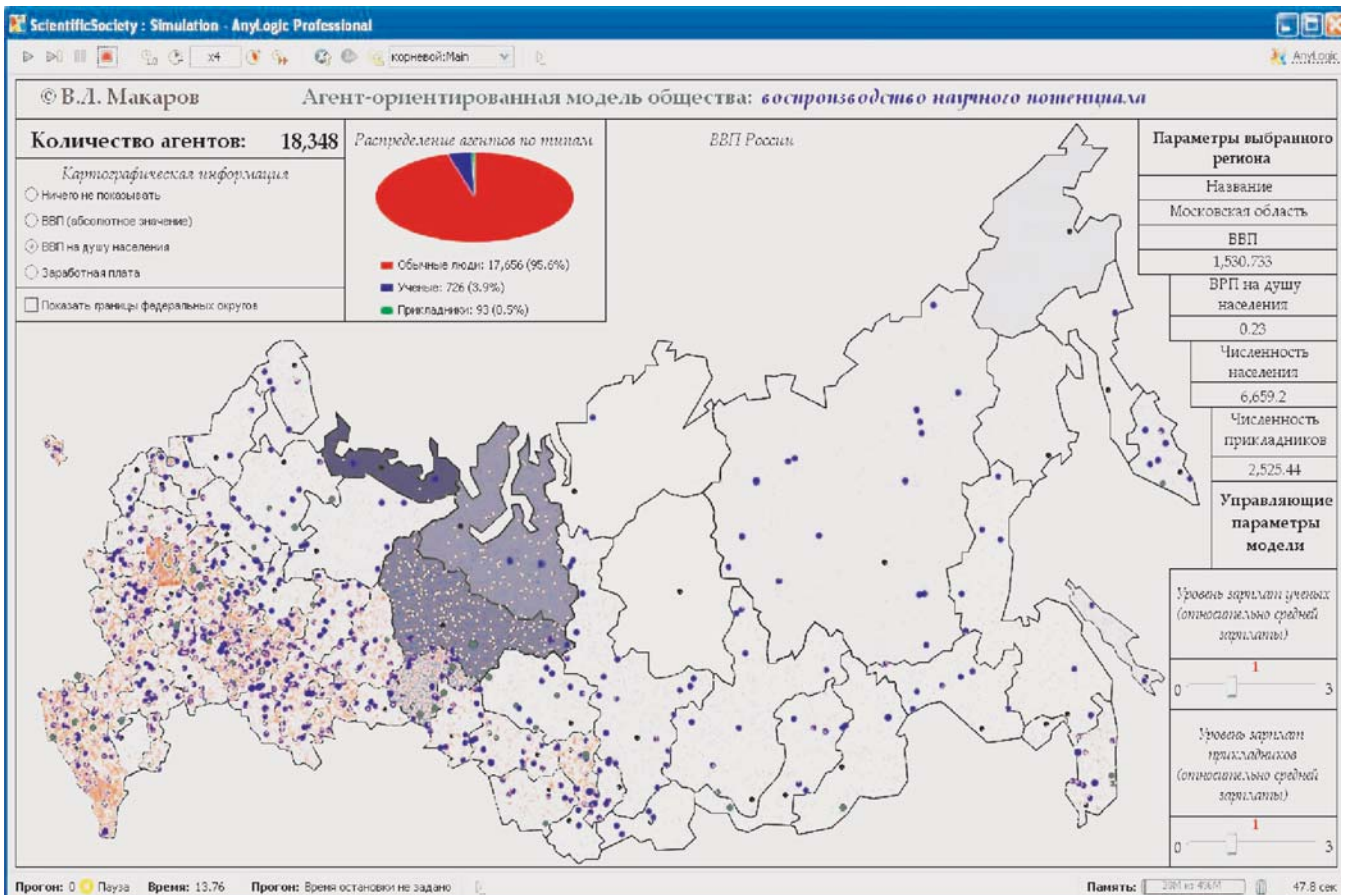


Рис. 19. Рабочее окно АОМ воспроизводства научного потенциала России

- специализация родителей,
- место работы,
- регион проживания,
- доход.

Спецификация регионов (элементов ГИС) осуществлялась с учетом следующих параметров:

- географические границы,
- количество жителей,
- количество работников (по типам),
- ВРП,
- ВРП на душу,
- объем инвестиций,
- объем инвестиций на душу,
- средняя заработная плата,
- средняя продолжительность жизни,
- показатель прироста населения и др.

Для наполнения модели данными использовались статистические сборники: 1) Регионы России; 2) Наука России в цифрах; 3) Индикаторы науки; 4) Индикаторы образования. Помимо этого были использованы социологические базы данных RLMS.

Кроме того, для спецификации производственных функций производителей использовались результаты, полученные с помощью вычислимой модели экономики знаний.

На рис. 19. изображено рабочее окно разработанной АОМ. Благодаря возможностям ГИС в процессе работы системы можно получать оперативную информацию о социально-экономическом положении всех регионов России (в том числе с использованием картографической информации, меняющейся в режиме реального времени в зависимости от значений эндогенных параметров).

Предварительные расчеты показали, что времени, необходимого для исчезновения прослойки ученых, требуется намного меньше, чем для ее создания.

## 8. Заключение

Как было показано в статье, АОМ дополняют традиционные аналитические методы, а также ограничено включают в себя упомянутые выше подходы имитационного моделирования, поскольку последние могут применяться «внутри» агентной модели при формализации ее отдельных активных объектов или агентов. Появление АОМ можно рассматривать как результат эволюции в компьютерном имитационном моделировании.

В настоящее время существует несколько международных ассоциаций, включающих в себя исследовательские группы из крупнейших исследовательских институтов и университетов, задействованных в данном направлении. Наиболее известными из них являются: 1) North American Association for Computational Social and Organizational Sciences (NAACSOS); 2) European Social Simulation Association (ESSA); 3) Pacific Asian Association for Agent-Based Approach in Social Systems Science (PAAA).

Каждая из перечисленных ассоциаций относится к определенной территории (Америка, Европа и Азия), проводит периодические конференции по социальному моделированию, но, кроме того, раз в два года проводится общий мировой конгресс по данной тематике. Первый мировой конгресс прошел в г. Киото (август 2006 г.), второй — в г. Вашингтоне (июль 2008 г.), а третий состоится в г. Кассель (сентябрь 2010 г.).

В России АОМ получили развитие относительно недавно, однако уже существует интернет-сайт, со-

державший информацию о разработках в данной области ([www.artsoc.ru](http://www.artsoc.ru)), в конце 2006 г. начат выпуск ежеквартального журнала «Искусственные общества», в Центральном экономико-математическом институте РАН функционирует Лаборатория искусственных обществ, являющаяся флагманом этого научного направления в нашей стране.

## Литература

1. *Axelrod R.* The Complexity of Cooperation: Agent-Based Models of Competition and Collaboration. Princeton: Princeton University Press, 1997.
2. *Bonabeau E.* Agent-based modeling: methods and techniques for simulating human systems // Proc. National Academy of Sciences. 2002. N 99 (3).
3. *Epstein J. M.* Remarks on the foundations of agent-based generative social science // Handbook on Computational Economics. V. II / K. Judd and L. Tesfatsion (eds). North Holland Press, 2005.
4. *Parker J.* A Flexible, Large-Scale, Distributed Agent Based Epidemic Model // CSED Working Paper. 2007. N 52.
5. *Von Neumann J.* Theory of Self-Reproducing Automata / University of Illinois Press. Urbana, 1966/
6. *Ulam S.* Sets, Numbers and Universes. Cambridge, MA, 1974.
7. *Gardner M.* Mathematical Games // Scientific American. October 1970.
8. *Борщев А. В.* Практическое агентное моделирование и его место в арсенале аналитика Exponenta PRO. 2004. № 3–4 (7–8).
9. *Паринов С. И.* Новые возможности имитационного моделирования социально-экономических систем // Искусственные сообщества. 2007. № 3–4.
10. *Poundstone W.* The recursive universe. Chicago, IL: ContemporaryBooks, 1985.
11. *Epstein J., Axtell R.* Growing Artificial Societies: Social Science From the Bottom up. Washington, DC: Brookings and Cambridge, MA: MIT Press, 1996.
12. *Yorke J. A. et al.* Seasonality and the requirements for perpetuation and eradication of viruses in populations // Journal of Epidemiology. 1979. V. 109.
13. *Wilensky U.* NetLogo Virus model // <http://ccl.northwestern.edu/netlogo/models/Virus/> Center for Connected Learning and Computer-Based Modeling, Northwestern University. Evanston, IL, 1998.
14. *Schelling T. S.* Micromotives and Macrobehavior. W. W. Norton and Co, N. Y, 1978.
15. *Wilensky U.* NetLogo Heatbugs model // <http://ccl.northwestern.edu/netlogo/models/Heatbugs/> Center for Connected Learning and Computer-Based Modeling, Northwestern University. Evanston, IL, 2004.
16. *Круглов В. В., Борисов В. В.* Искусственные нейронные сети. Теория и практика. М.: Горячая линия-Телеком, 2002.
17. *Tesfatsion L.* Agent-Based Computational Economics: Modelling Economies as Complex Adaptive Systems. 2002 // <http://www.econ.iastate.edu/tesfatsi>.
18. *Economic Simulation in SWARM: Agent Based Modeling and Object Oriented Programming / Ed. by Francesco Luna and Benedikt Stefansson.* Kluwer Academic Publishers, 2000.
19. *Гуц А. К., Коробицын В. В., Лаптев А. А., Паутова Л. А., Фролова Ю. В.* Компьютерное моделирование. Инструменты для исследования социальных систем: Учебное пособие. Омск: Омский гос. ун-т, 2001.
20. *Карпов Ю.* Имитационное моделирование систем. Введение в моделирование с AnyLogic 5. СПб.: БХВ-Петербург, 2006.
21. *Helbing D. (ed.)* Managing Complexity: Insights, Concepts, Applications // Springer. Berlin, 2007.
22. *Deguchi H.* Economics as an Agent-Based Complex System. Springer, 2004.
23. *Макаров В. Л., Житков В. А., Бахтизин А. Р.* Регулирование транспортных потоков в городе — проблемы и решения // Экономика мегаполисов и регионов. 2009. № 3 (27).