УДК 004

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ: КЛЕТОЧНЫЙ АВТОМАТ И АГЕНТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Королев Александр Леонидович,
кандидат технических наук, доцент кафедры информатики,
информационных технологий и методики обучения информатике, Южно-Уральский государственный
гуманитарно-педагогический университет,
Челябинск, Россия.
koroleval@cspu.ru

В статье рассматриваются некоторые задачи компьютерного моделирования развития популяций и развития эпидемии. Реализация моделей проводится в среде *MVS* (*Model Visio Studium*). Представлены задачи развития популяции, системы «хищник – жертва», развития эпидемии. Материал статьи можно использовать для расширения представления о возможностях современной технологии компьютерного моделирования, развития тематики самостоятельной работы и проектной деятельности. В публикации отражен личный опыт автора в преподавании учебных курсов «Информатика» и «Компьютерное моделирование» в ЮУрГГПУ и учебного курса «Информатика» в средней школе.

***Ключевые слова*:** компьютерное моделирование в среде MVS; экология; тематика проектной деятельности.

SIMULATION MODELING: CELLULAR AUTOMATIЦT AND AGENT-BASED MODELING

Korolev Alexander,
candidate of Technical Sciences,
Associate Professor of the Department of Informatics,
Information Technologies and Methods of Teaching Informatics,
South Ural State University for the Humanities and Pedagogy,
Russia

The article discusses some problems of computer modeling of population development and epidemic development. The models are implemented in the MVS (Model Vision Studium) environment. The tasks of population development, the predator-prey system, the development of the epidemic are presented. The material of the article can be used to expand the understanding of the possibilities of modern computer modeling technology, the development of the subject of independent work and project activities. The publication reflects the personal experience of the author of teaching the courses "Computer Science" and "Computer modeling" at SUSSPU and teaching the course "Computer Science" in secondary school.

Keywords: computer modeling in the MVS environment; ecology; topics of project activity.

1. Введение

В современных школьных учебниках информатики [4] имитационное моделирование рассматривается на примерах задач моделирования систем массового обслуживания, например, модель обслуживания клиентов в банке (или в супермаркете, или на телефонной станции и т. п.). В подобных моделях содержатся случайные факторы: клиенты поступают постоянно, но через случайные интервалы времени и время обслуживания каждого клиента – случайная величина. Такие модели называются событийными, и в них моделируются случайные события.

Моделированию случайных событий посвящена работа [2], в которой рассматривается модель автопредприятия, состоящего из нескольких автомобилей, которые с определенной вероятностью могут выходить из строя и также с заданной вероятностью ремонтируются в определенные сроки и воз-

вращаются к работе. В итоге модель позволяет определить число рабочих дней и количество работающих автомобилей в данный период.

В настоящее время существуют другие виды имитационного моделирования: агентное моделирование, событийное моделирование, системная динамика. По нашему мнению, знакомство с современными методами и подходами, в частности, к имитационному моделированию для школьного курса информатики является актуальной задачей.

Можно выделить несколько основных преимуществ имитационного моделирования:

1) имитационные модели позволяют анализировать системы и находить решения в тех случаях, когда такие методы, как аналитические методы или вычисления, а также линейное программирование не справляются с задачей;

2) структура имитационной модели естественным образом отображает структуру моделируемой системы;

3) имитационная модель позволяет отслеживать все объекты системы, учтенные в модели и проводить статистический анализ;

4) одним из главных преимуществ имитационного моделирования является возможность многократно проигрывать модель во времени и анимировать ее поведение. Анимация будет неоспоримым преимуществом при демонстрации модели и может оказаться полезной для верификации модели и нахождения ошибок;

5) имитационные модели намного убедительнее электронных таблиц. Если вы используете имитационное моделирование, то при презентации проекта у вас будет явное преимущество перед теми, у кого на руках только цифры и решение, полученное из «черного ящика».

В целом имитационное моделирование рассматривает такие модели, в которых результат возможно получить только в ходе компьютерного эксперимента с моделью, причем во многих случаях требуется многократное повторение экспериментов с целью получения статистики о характеристиках случайных событий.

Известна разработка для профильных классов [4], предназначенная для знакомства с программным комплексом имитационнго моделирования AnyLogic [5] и современными технологиями моделирования. Внедрение данного программного комплекса в учебный процесс в том объеме, который предусмотрен в задачнике-практикуме [1],требует серьезной подготовки учителя информатики и подбора такого круга задач, которые будут актуальны и понятны учащимся. В целом, имеющийся личный опыт руководства выпускными квалификационными работами студентов, будущих учителей информатики, говорит о том, что эффективно только знакомство учащихся с возможностями AnyLogic путем демонстрации готовых компьютерных AnyLogic-моделей [3].

Однако существует особый интересный вид моделей – клеточные автоматы [6]. ***Кле́точный автома́т*** – дискретная модель, изучаемая в математике, в физике, в теоретической биологии. Включает регулярную решетку ячеек, каждая из которых может находиться в одном из состояний, таких как 1 и 0. Для клеточного автомата требуется задание начального состояния всех ячеек и правил перехода ячеек из одного состояния в другое.

Моделирование на основе клеточных автоматов можно рассматривать как пример **имитационного моделирования**. Действительно, модели данного вида представляют собой алгоритм функционирования системы, который не имеет аналога в виде математической модели. Динамика изменения состояния автомата может быть исследована только путем модельного компьютерного эксперимента. Другим способом предсказать какие-либо закономерности развития системы невозможно. Можно считать, что модели типа «клеточный автомат» являются предшественниками **агентного моделирования**, о котором поговорим ниже.

В 1970 г. Джон Конвей построил клеточный автомат, который реализовал в форме компьютерной игры «Жизнь» («Life»).

Название связано с тем, что игра имитирует рост, распад и различные изменения в популяции живых организмов, которые происходят по определенным правилам.

Основная идея клеточного автомата «Жизнь» состоит в том, чтобы, начав с какого-нибудь расположения «организмов» по различным клеткам, проследить за эволюцией исходной позиции под действием «генетических законов», которые управляют рождением, гибелью и выживанием клеток.

Законы эволюции клеток таковы, что различные начальные конфигурации могут закончить свою эволюцию одним из трех способов:

• полностью исчезают из-за перенаселенности или разреженности жизненного пространства, т. е. популяция вырождается (все погибли);

• переходят в устойчивую конфигурацию и перестают изменяться вообще – эволюция вышла на стационарный режим;

• выходят на колебательный режим, при котором совершают некий бесконечный цикл превращений с определенным периодом.

В игре каждую клетку окружают восемь соседних клеток. Законы развития состоят в следующем:

• каждая клетка может быть живой или мертвой;

• поколения сменяются синхронно по простым правилам:

• в пустой (мертвой) клетке, рядом с которой ровно три живые клетки, зарождается жизнь;

• если у живой клетки есть две или три живые соседки, то эта клетка продолжает жить; в противном случае (если соседей меньше двух или больше трех) клетка умирает «от одиночества» или «от перенаселенности».

Гибель и рождение всех клеток происходят одновременно. Выжившие и вновь рожденные организмы образуют одно поколение. Как показал многолетний опыт, различные начальные конфигурации порождают ряд типовых периодических или стационарных структур. Не найдено начального состояния, при котором происходило бы неограниченное расширение колонии клеток.

Хотя игра состоит из простых правил, тем не менее она повлияла на многие разделы таких точных наук, как математика, информатика, физика. Многие закономерности, обнаруженные в игре, имеют свои аналогии в других, совершенно «нематематических», дисциплинах.

Сама игра является удачной попыткой Дж. Конвея доказать существование простых самовоспроизводящихся и самоорганизующихся систем.

В биологии наблюдается внешнее сходство с развитием популяций примитивных организмов. Рождение и смерть клеток аналогичны процессу возникновения и исчезновения нейронных импульсов, которые и формируют процесс мышления.

Эволюции некоторых сложных колоний схематично повторяют этапы развития спиралевидных галактик. Процессы, которые наблюдаются в игре «Жизнь», во многом схожи с явлениями, происходящими при взаимодействии больших, средних и малых социальных групп.

Таким образом, эта простая игра позволяет наблюдать фундаментальную закономерность – из простых правил поведения элементов в системах возникают сложные закономерности и в первоначальном хаосе возникают упорядоченные структуры. Подобные закономерности изучает синергетика – наука, занимающаяся изучением процессов самоорганизации, возникновения и распада структур самой различной природы, становление порядка через хаос.

Для практической реализации клеточных структур можно воспользоваться онлайн-ресурсом по адресу http://www.michurin.net/online-tools/life-game.html.

Пример 1.

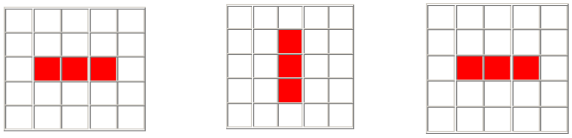

Рис. 1а *Рис. 1б* *Рис. 1в*

Начальная конфигурация состоит из трех клеток, расположенных подряд (рис. 1а). Ясно, что крайние клетки погибают, так как у них только один сосед. Зато в свободных клетках, находящихся выше и ниже средней фишки, происходит рождение новых клеток, поэтому следующее поколение состоит из трех клеток, расположенных подряд, но уже вертикально. Начальная конфигурация повернулась на 90° (рис. 1б). В соответствии с генетическими законами второе поколение совпадет с исходным поколением (рис. 1в). В итоге получен пульсирующий, периодический режим эволюции с периодом, составляющим два поколения.

Пример 2. В начальной конфигурации, изображенной на рисунке 2а, выживает лишь верхняя клетка, а рождение происходит в клетке, расположенной ниже, – она окружена тремя соседями. Следующее поколение (см. рис. 2б) состоит из двух клеток, из которых одна находится выше другой. Каждая из них имеет лишь одного соседа и, следовательно, погибает. Это пример вырождения популяции.

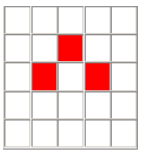

Рис. 2а. Вырождение популяции

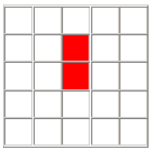

Рис. 2б. Вырождение популяции

Пример 3. На рисунке 3а изображена начальная конфигурация, состоящая из семи горизонтальных клеток, а на рисунке 3б – ее 14-е поколение. Самостоятельно получите пропущенные 13 поколений, а также 14-е и 15-е. Убедитесь, что 15-е поколение ничем не отличается от предыдущего. Значит, в данном случае эволюция на 14-м шаге вышла на стационарный режим. Это примеры устойчивых, самовоспроизводящихся конфигураций.

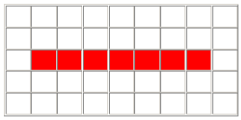

Рис. 3а. Начальное состояние

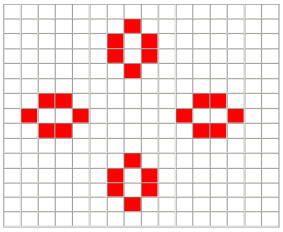

Рис. 3б. Стационарный режим

Представленные ниже задания позволяют познакомиться с другими особенностями процессов в данном клеточном автомате.

Задание 1. Исследуйте эволюцию начальных конфигураций по рис. 4. Установите устойчивые и периодические конфигурации.

Задание 2. Исследуйте эволюцию начальных конфигураций, изображенных на рисунке *5*. Установите устойчивые, вырождающиеся и периодические конфигурации.

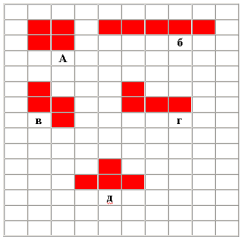

Рис. 4

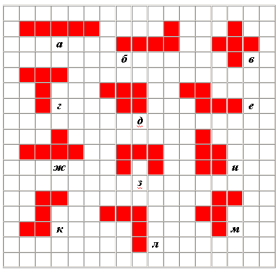

Рис. 5

Задание 3. Покажите, что внутренняя часть конфигурации, изображенной на рисунке 6, поворачивается на 90° по часовой стрелке на каждом шаге, а все блоки остаются на месте, т. е. эволюция этой конфигурации периодическая с периодом 4 шага.

Задание 4. Покажите, что конфигурация по рисунку 7 повторяется циклически через каждые 8 шагов.

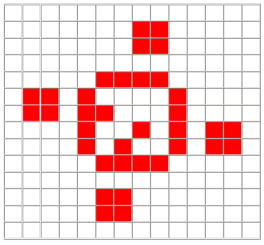

Рис. 6

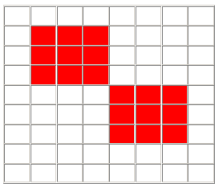

Рис. 7

Задание 5. Проследите за судьбой «Чеширского кота» (рис. 8). Убедитесь, что на шестом ходу от него остается только улыбка (рис. 9), которая затем пропадает, и остается лишь след лапы (блок из четырех фишек). (Напомним, что «Чеширский кот» обладает чудесной способностью исчезать, оставляя только свою улыбку).

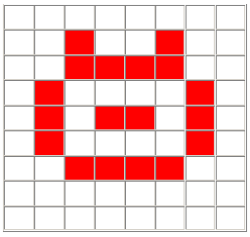

Рис. 8. «Чеширский кот»

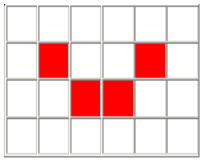

Рис. 9. «Улыбка «Чеширского кота»

Агентное моделирование – метод имитационного моделирования, исследующий поведение децентрализованных агентов и то, как такое поведение определяет поведение всей системы в целом.

Идея агентного моделирования состоит в следующем:

• сложная система состоит из множества простых объектов;

• объекты моделируются агентами;

• смена внутреннего состояния объекта имитируется изменением состояния агента;

• агент взаимодействует с другими агентами и со средой обитания подобно объектам реального мира;

• агент имеет внутреннее представление окружающего мира;

• агент имеет набор правил поведения для реакции на внешние события.

Таким образом, агент – некая сущность, которая имеет автономное поведение, может принимать решения в соответствии с набором правил, может взаимодействовать с окружением и другими объектами.

Агенты не являются клеточными автоматами и не обязательно обитают в дискретном пространстве (как в игре «Жизнь»).

При помощи агентов моделируют рынки, конкуренцию и цепочки поставок, деятельность населения и многое другое. Агентные модели позволяют получить представление об общем поведении системы исходя из предположений о поведении ее элементов при отсутствии знания о глобальных законах, то есть в наиболее общем случае.

Аппарат агентного моделирования – математическая логика с дискретным представлением времени.

Рис. 10. Имитация стаи волков

Для имитации волчьей стаи (рис. 10), в которой действуют правила коллективного поведения, обусловленные необходимостью выживания в суровых зимних условиях, эти правила наиболее ярко выражены. Для агентов (волков) правила просты:

• следовать к средней позиции своих соседей;

• избегать локального скопления вместе с соседями;

• следовать среднему направлению своих соседей.

Имитация экологической системы «**хищник – жертва**» сводится к заданию правил поведения «**хищников**», которые питаются «**жертвами**» и перемещаются для их поиска. «Жертвы» питаются растительным кормом, перемещаются для его поиска и стараются избежать встречи с «хищниками» (рис. 11).

Кормовая база для каждого вида ограничена численностью «жертв» и объемом растительного корма, который возобновляется, в ареале обитания «жертв» по мере роста растений. Более сложные взаимодействия в экосистеме отражены на рис. 15.

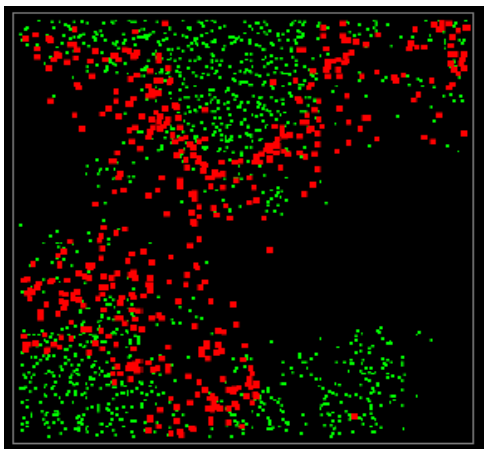

Рис. 11. Взаимодействия в системе «**хищник – жертва**».
AnyLogic-модель

2. Клеточные автоматы и агентное моделирование

Следующим шагом развития подобного подхода является агентно-ориентированное моделирование (АОМ). Про агента можно сказать следующее.

 Агент – индивидуум, состоящий из отдельных частей с определенным набором характеристик и правил, управляющих его поведением и отвечающих за принятие решений.

 Агент помещен в определенную среду, живет в ней и взаимодействует с другими агентами. Агенты способны распознавать и различать черты других агентов.

 Агент целеустремлен, имеет цели, которые необходимо достичь, исходя из его поведения.

Таким образом, агент – некая сущность, которая имеет автономное поведение, может принимать решения в соответствии с набором правил, может взаимодействовать с окружением и другими объектами. Программной реализацией агента является объект некоторого класса.

 Агенты не являются клеточными автоматами и не обязательно обитают в дискретном пространстве (как в игре «Жизнь»). Во многих агентных моделях пространство может вообще отсутствовать. Когда пространство все же необходимо, оно чаще всего является непрерывным (это может быть карта мира или план здания).

 Агенты – не обязательно люди. Агентом может быть все, что угодно: транспортное средство, оборудование, проект, организация или даже идея.

 Агентом может быть объект, кажущийся абсолютно пассивным. Например, в модели нефтепровода вы можете представить сегмент трубы как агента, задав для него графики техобслуживания, вероятности происхождения аварий, логику проведения ремонтных работ, затраты и т. д.

 Агентов в модели может быть как много, так и мало. При этом агенты могут быть как одного типа, так и разных типов (многоагентные модели).

 Существуют агентные модели, в которых агенты вообще не взаимодействуют друг с другом. Например, в моделях развития хронических заболеваний индивидуальная динамика агента зависит только от его личных параметров и, только в некоторых случаях, от среды.

В имитационном моделировании **агентные модели** могут быть как очень детализированными, когда агенты представляют физические объекты, так и предельно абстрактными, когда с помощью агентов моделируются конкурирующие компании или правительства государств. Аппарат агентного моделирования – математическая логика с дискретным представлением времени.

Рис. 12. Выбор типа модели

Главное свойство агентной модели состоит в том, что сложное поведение системы складывается из комбинации простых правил поведения агентов.

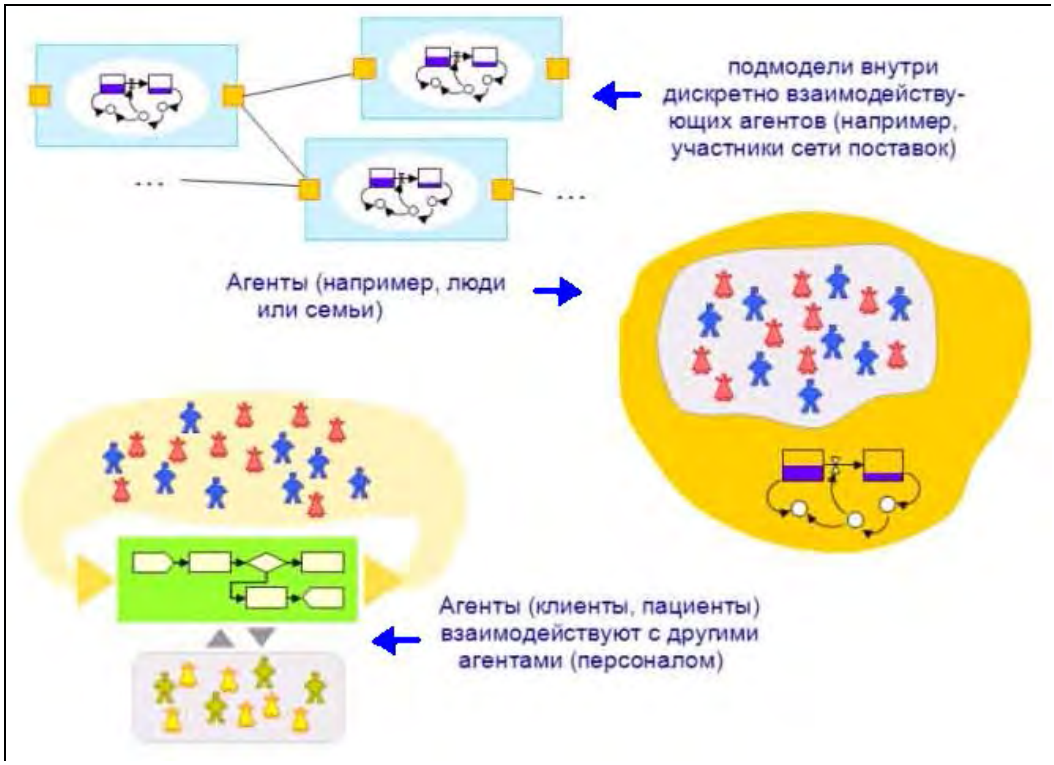

Рис. 13. Примеры систем, которые моделируются АОМ

Имитация покупателей, розничных и оптовых торговцев, дистрибьютеров, производителей как агентов представлена на рис. 14.

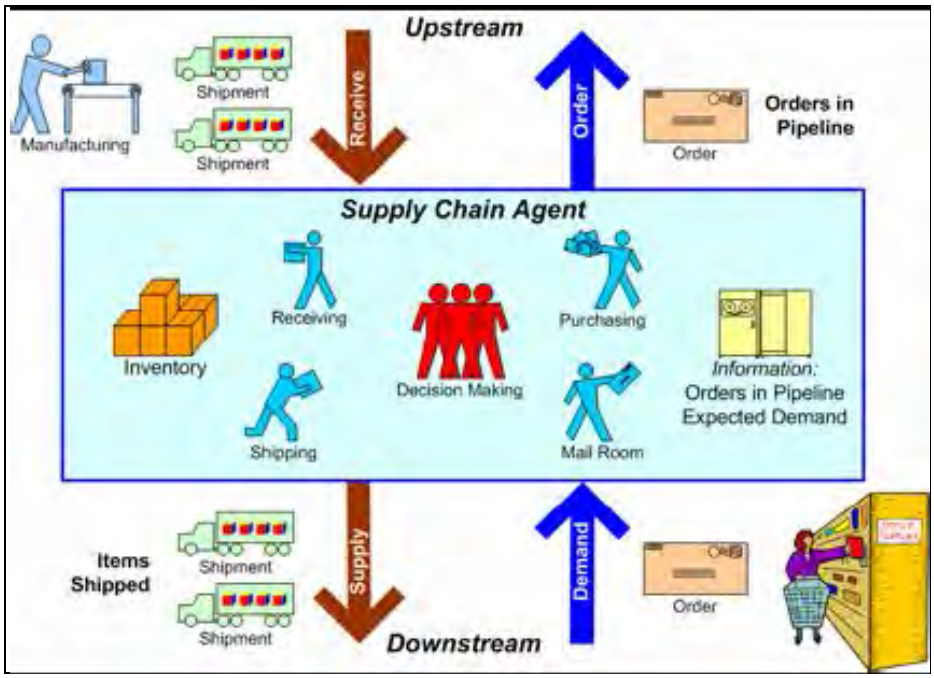

Рис. 14. Моделирование цепочки поставок

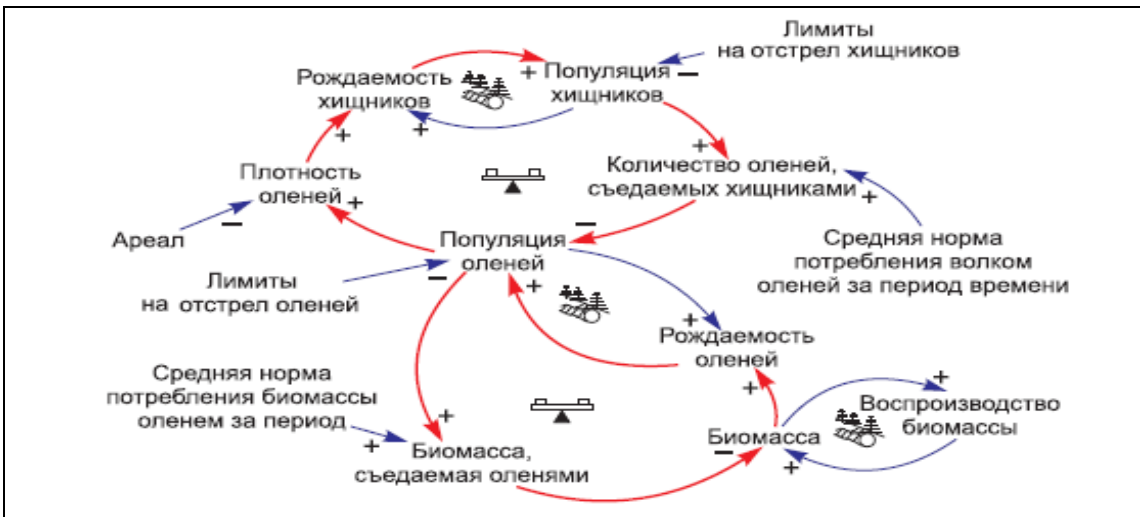

Рис. 15. Взаимодействия в системе «**хищник – жертва**» с учетом отстрела

Таким образом, области применения агентного моделирования – это:

- экономические и логистические процессы;
- развитие цивилизации;
- социальные отношения;
- политика;
- когнитивные аспекты общения;
- физические, химические и биологические процессы;
- экология.

Агентное моделирование (англ. *agent-based model (ABM)*) – метод имитационного моделирования, исследующий поведение децентрализованных агентов и то, как такое поведение определяет поведение всей системы в целом. В отличие от системной динамики, аналитик определяет поведение агентов на индивидуальном уровне, а глобальное поведение возникает как результат деятельности множества агентов (моделирование «снизу вверх»).

Агентное моделирование включает в себя клеточные автоматы, элементы теории игр, сложных систем, мультиагентных систем и эволюционного программирования, методы Монте-Карло, использует случайные числа.

3. Имитационное моделирование на основе клеточных автоматов

Теоретическое введение. Моделирование на основе клеточных автоматов – это пример **имитационного моделирования**. Действительно, модели данного вида представляют собой **алгоритм** функционирования системы, который не имеет аналога в виде математической модели. Динамика изменения состояния автомата может быть исследована только путем модельного эксперимента. Другим способом предсказать какие-либо закономерности развития системы невозможно.

Клеточным автоматом называется сеть из дискретных элементов, меняющих свое состояние в дискретные моменты времени. Каждый автомат или клетка может находиться в конечном числе состояний. Время в данной модели является дискретным множеством тактов.

Состояние автомата в следующий момент времени определяется его собственным состоянием и состоянием его ближайших соседей в предыдущий момент времени. Среда предполагается однородной, т. е. правила изменения состояний для всех клеток одинаковы. Клеточные автоматы моделируют поведение системы, имитируя шаг за шагом ее эволюцию.

Основная идея клеточного автомата «Жизнь» состоит в том, чтобы, начав с какого-нибудь расположения «организмов» по различным клеткам, проследить за эволюцией исходной позиции под действием «генетических законов», которые управляют рождением, гибелью и выживанием клеток.

Порядок выполнения работы. Провести ряд компьютерных экспериментов с имитационной моделью клеточного автомата **«Life»**. Проверить основные закономерности развития системы.

Хотя игра состоит из простых правил, тем не менее она много лет привлекает пристальное внимание ученых. Игра «Жизнь» и ее модификации повлияли (в ряде случаев взаимно) на многие разделы таких точных наук, как математика, информатика, физика.

Кроме того, многие закономерности, обнаруженные в игре, имеют свои аналогии в других, совершенно «нематематических», дисциплинах.

Вот список наук, теории которых имеют точки соприкосновения с феноменами игры «Жизнь».

• **Кибернетика.** Сама игра является удачной попыткой Дж. Конвея доказать существование простых самовоспроизводящихся и самоорганизующихся систем.

• **Биология.** Внешнее сходство с развитием популяций примитивных организмов.

•**Физиология.** Рождение и смерть клеток аналогичны процессу возникновения и исчезновения нейронных импульсов, которые и формируют процесс мышления.

•**Астрономия.** Эволюции некоторых сложных колоний схематично повторяют этапы развития спиралевидных галактик.

• **Физика твердого тела.** Теория автоматов вообще и игра «Жизнь» в частности используются для анализа явлений переноса, диффузии, вязкости и теплопроводности.

• **Квантовая физика.** Поведение «жизненных» ячеек (рождение новых и взаимное уничтожение) во многом напоминают процессы, происходящие при столкновении элементарных частиц.

• **Электротехника.** Правила игры используются для моделирования самовосстанавливающихся электрических цепей.

• **Социология.** Процессы доминации, вытеснения, поглощения, сосуществования, слияния и уничтожения популяций во многих аспектах схожи с явлениями, происходящими при взаимодействии больших, средних и малых социальных групп.

Приведенный список примеров наводит на мысль о том, что все во Вселенной развивается по одним и тем же фундаментальным законам. Возможно, эта игра связана и с другими научными явлениями, о которых современной науке пока неизвестно.

Список литературы

1. Калинин И. А., Самылкина Н. Н., Бочаров П. В. Информатика. 10–11 классы. Задачник-практикум. Углубленный уровень. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2013. 248 с.

2. Королев А. Л. Моделирование случайных событий с помощью электронных таблиц // Информатика в школе. 2019. № 2 (145). С. 48–54.

3. Королев А. Л., Паршукова Н. Б. Исследовательская деятельность будущих учителей информатики при изучении компьютерного моделирования // Вестник Южно-Уральского государственного гуманитарно-педагогического университета. Серия: «Педагогические науки». 2020. № 7 (180). С. 59–72.

4. Поляков К. Ю., Еремин Е. А. Информатика. углубленный уровень : учебник для 11 класса. Ч. 2. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний. 2013. 304 с.

5. Сайт компании AnyLogic. URL: https://www.anylogic.ru./.

6. Тарасевич Ю. Ю. Математическое и компьютерное моделирование. Вводный курс. М.: Едиториал УРСС, 2019. 149 с.