



Искусственные общества. 2013-2026

ISSN 2077-5180

URL - <http://artsoc.jes.su>

Все права защищены

Выпуск 4 Том 17. 2022

Современные программные средства агент-ориентированного моделирования

Брагин Алексей Владимирович

*Центральный экономико-математический институт Российской академии наук
Российская Федерация, Москва*

Бахтизин Альберт Рауфович

*Центральный экономико-математический институт Российской академии наук
Российская Федерация, Москва*

Макаров Валерий Леонидович

*Центральный экономико-математический институт Российской академии наук
Российская Федерация, Москва*

Аннотация

В статье описывается современное состояние отрасли программных инструментов для создания агент-ориентированных моделей, проведения агент-ориентированного имитационного моделирования и обработке результатов такого моделирования. Несмотря на большое число статей о различных проблемах в области агент-ориентированного моделирования и обзоров некоторых программных средств, опубликована только одна исчерпывающая англоязычная работа по этому вопросу в 2017. Публикации последних лет не вполне отражают состояние отрасли, обзоры на русском языке практически отсутствуют. Данная работа посвящена обзору средств агент-ориентированного и имитационного моделирования с их краткой характеристикой.

Ключевые слова: агент-ориентированное моделирование, программное обеспечение, имитационное моделирование, JAVA, C#

Дата публикации: 18.12.2022

Ссылка для цитирования:

Введение

Несмотря на то, что агент-ориентированное моделирование является сравнительно новым направлением в имитационном моделировании, уже разработано множество как просто моделей, так и целых систем для построения агент-ориентированных моделей. Общее количество только широкодоступного программного обеспечения для агент-ориентированного моделирования приближается к сотне и с каждым годом появляются новые программы.

Эта статья будет полезна учёным, проводящим моделирование тех или иных процессов и нуждающихся в быстром и правильном выборе программного обеспечения по совокупности различных критериев, таких как максимальному числу агентов в модели, назначению (обучение агент-ориентированному моделированию или построение реальных моделей), необходимому оборудованию (персональные компьютеры, серверы, серверы, объединённые в сеть, суперкомпьютеры), областям применения, языку программирования и пр.. Также статья полезна и тем, кто занимается разработкой новых моделей и нового программного обеспечения для разработки моделей.

В данной работе сначала рассматривается само понятие модели, эволюция понятия агент-ориентированной модели во времени и понимании учёными в России и зарубежом и приводится описание ранее опубликованных обзоров программного обеспечения и различных моделей, которые также легли в основу и этой статьи. В основной части статьи рассматриваются все найденные программы, начиная с тех, которые уже не доступны на данный момент, но тем не менее представляют практическую и научную ценность. Далее приводится обзор с классификацией программ общего назначения, программ для суперкомпьютерного моделирования, и программного обеспечения для применения в более узких областях. В завершение приводится анализ динамики используемых при разработке языков программирования со сравнением их производительности.

Эволюция понятий агент-ориентированного моделирования

В понимании компьютерного имитационного моделирования *модель* — это «абстрактное и упрощённое представление существующей или только планируемой реальности. Модели обычно создаются для изучения и объяснения наблюдаемых явлений или для того, чтобы эти явления предвидеть» [13].

Понятие *агент-ориентированной модели* (далее – АОМ) по-разному описывается в литературе, в зависимости от автора и времени публикации. Д. Эпштейн в своей книге [18] в 1996 году вводит понятие АОМ как *искусственного общества*, в котором *агенты* — это «население», «люди» этого искусственного общества. Это же утверждение приводится и в работе [24], изданной в 2022 году в соавторстве с В.Л. Макаровым и А.Р. Бахтизиным. Сама методология агент-

ориентированного моделирования по мнению Д. Эпштейна [4, 18] начинается с клеточного автомата фон Неймана и объединяет различные элементы многих областей науки включая кибернетику, коннекционизм в когнитивистике, распределённый искусственный интеллект, клеточные автоматы, генетические алгоритмы, генетическое программирование, искусственную жизнь и моделирование популяций в биологии.

⁶ Н. Гилберт в работе [19] опубликованной в 2008 году определяет агент-ориентированное моделирование как вычислительный метод, позволяющий исследователю создавать и анализировать модели, состоящие из агентов, которые взаимодействуют в среде, а также экспериментировать с построенными моделями. Главными особенностями АОМ, отмеченными в этой работе, являются возможности:

- ⁷
- взаимодействия агентов,
 - передачи информационных сообщений друг другу,
 - действовать на основе информации из принятых сообщений.

⁸ Информационные сообщения могут представлять как прямой «диалог» между агентами, так и косвенные средства получения информации, такие как наблюдение за другим агентом или влияние действий другого агента. Возможность моделирования таких межагентных взаимодействий является основным отличием агент-ориентированного моделирования от других видов вычислительных моделей.

⁹ Формальное определение агента даётся в работе Э. Бонабо [14]. В АОМ моделируемая система представляется множеством объектов, самостоятельно принимающих решения. Такие объекты принято называть агентами. Каждый агент индивидуально оценивает ситуацию со своей точки зрения и принимает решения на основе заданного набора правил. За счёт этого даже самая простая агент-ориентированная модель может показывать сложные поведенческие шаблоны [31]. В.Л. Макаров в [5] описывая агентов агент-ориентированной модели показывает, что каждый агент в АОМ обладает:

- ¹⁰
- ресурсами - заданным набором характеристик;
 - интересами - целевой функцией;
 - поведением - на основе чего имитируется его реакция на изменения внешней среды, затрагивающие сферу его интересов.

¹¹ В работах 2008-2011 гг. А.Р. Бахтизин, М.Р. Фаттахов и др. авторы [1, 8] определяют АОМ как специальный класс моделей, основанных на индивидуальном поведении агентов и создаваемых для компьютерных симуляций. В 2012 г. в работе Е.Д. Сушко [7] даётся такое определение АОМ: «Агент-ориентированная (мультиагентная) модель представляет собой искусственное общество, состоящее из взаимодействующих между собой самостоятельных агентов, каждый из которых обладает заданным набором личностных характеристик («ресурсов»), целевой функцией («интересами») и подчиняется

правилам поведения, предопределяющим его реакцию в различных ситуациях, затрагивающих сферу его интересов».

¹² Наиболее современным является следующее определение данное в монографии В.Л. Макарова [4] в 2022 г., которое записано следующим образом: классическая агентная модель представляет собой общество, состоящее из индивидуумов, созданных программным способом и взаимодействующих между собой в некоторой среде (напр. организация, социальная сеть, город, регион, страна или весь мир).

¹³ Актуальность исследований в области агент-ориентированного моделирования приводит к регулярной публикации в научной литературе обзоров и анализа имеющихся на сегодняшний день технических средств для агент-ориентированного и имитационного моделирования.

¹⁴

Ранее опубликованные обзоры программного обеспечения для агент-ориентированного моделирования

В ряде научных работ опубликованы результаты исследований инструментальных сред (англ. – toolkits) для агент-ориентированного моделирования в определённых областях. Так, работа [32], опубликованная в 2002 году, представляет обзор двадцати инструментальных средств для проектирования агентов, моделей и выполнения симуляций в области высшего образования. Выводом данной работы стало то, что ни одна из проанализированных программ не покрывает всех потребностей агент-ориентированного моделирования. В работах [36, 23] проведён обзор программного обеспечения агент-ориентированного моделирования для рынков энергопотребления. На основе проведённого анализа выявлена необходимость в специализированном программном обеспечении для создания агент-ориентированных моделей рынков электроэнергии. В [12] систематизированы онлайн-обзоры ПО агент-ориентированного моделирования и приведён примерный список ключевых проблем, которые надо решить для создания системы агент-ориентированного моделирования в области информатики и компьютерных наук. В [27] описывается возможность и полезность применения систем агент-ориентированного моделирования для симуляции/моделирования очень сложных одноранговых сетевых систем. Использование систем агент-ориентированного моделирования как мощного инструмента для изучения и анализа динамики потребительского рынка подробно изложено в [25]. Особенности выбора и применения нескольких систем агент-ориентированного моделирования, среди которых AgentSheets, AnyLogic, MASON, NetLogo, OBEUS, Repast, StarLogo, Swarm, приведены в [16], где основной упор сделан на геопространственное моделирование. В [13] выделены типичные элементы АОМ и сделан обзор двух популярных систем агент-ориентированного моделирования. Авторы в работе [34] провели удобную категоризацию различных характеристик программных пакетов для разработки моделей и проведения симуляций, однако предпочтение отдавалось программным платформам для конструирования агентов, а непосредственно проведение симуляций не обязательно должно было являться их сильной стороной. В дополнение к этому были проанализированы свободно доступные программные библиотеки, которые наилучшим образом бы подходили

для теории и практики имитационного моделирования на основе данных в общественных науках. По критериям минимизации затрат на создание модели лучшей была признана RePast.

¹⁵ Также различными авторами опубликован целый ряд работ [15, 27, 22, 28, 35, 1, 26] с всесторонними обзорами технических средств агент-ориентированного моделирования. В статье [29] проводится сравнительный анализ пяти программных платформ для агент-ориентированного моделирования: NetLogo, MASON, RePast, Swarm на языке Java, Swarm на языке Objective-C. Результатом проведённого анализа стало выявление приоритетных направлений в этих программных платформах, реализация которых поможет расширить их область применения. Статья [33] даёт обзор популярного программного обеспечения, проводит сравнительный анализ подходов и систем для параллельных и распределённых АОМ, и очерчивает круг будущих задач и проблем, которые могут возникнуть в будущем при проектировании подобных программных платформ. Сравнительный анализ программного обеспечения для проведения параллельной симуляции также был проведён в [30].

¹⁶ По-настоящему исчерпывающее исследование различных программных пакетов для создания АОМ и проведения имитационного моделирования провела С. Абар и др. авторы, результаты которого опубликованы в 2016 году в [10]. Ключевая особенность их работы состоит в очень широком охвате программного обеспечения и обобщении информации по каждому программному пакету для создания и запуска АОМ. Вся информация сведена в таблицу, в которой приводятся следующие характеристики:

- ¹⁷ • название программного пакета и его URL адрес;
- язык программирования и лицензия, по которой распространяется программный продукт и его исходный код (если он доступен);
- тип агентов в зависимости от механизма их взаимодействия;
- требования языка программирования и предоставление API (Application Program Interface) вместе с доступностью встроенных библиотек при разработке кода АОМ;
- доступность графического интерфейса программирования для редактирования кода и запуска симуляции;
- определение требований к компилятору и операционной системе, а также к аппаратному обеспечению;
- сложность разработки модели;
- возможности масштабирования разработанной модели;
- область применения создаваемых моделей;
- краткое описание функциональности, предоставляемой каждым программным пакетом.

Среди работ, опубликованных на русском языке, нужно отметить книгу В.Л. Макарова и А.Р. Бахтизина [6]. В ней даётся краткое описание и возможности нескольких наиболее часто цитируемых пакетов программного обеспечения для агент-ориентированного моделирования: Swarm на Objective-C, Repast (включая реализации RepastPy, RepastJ, Repast Symphony, Repast.NET, RepastHPC), NetLogo, Mason, EcoLab, SOARS, Comas. Более подробно рассмотрен программный пакет

AnyLogic [2], а также масштабируемая среда для моделирования агентных моделей FLAME (Flexible Large-scale Agent Modeling Environment) и построенная на её основе AOM европейской экономики EURACE. Отдельная глава книги посвящена разработке моделей для суперкомпьютеров и соответствующему программному обеспечению – RepastHPC, FLAME, ABM++ и ADEVs. Авторы описывают свой подход к адаптации AOM для суперкомпьютеров, проблемы масштабирования моделей, возможности оптимизации кода. Дополнительно рассматриваются программное обеспечение (ПО) для построения геоинформационных систем, вопросы интеграции AOM и геоинформационных систем. Книга тех же авторов, но в соавторстве с Дж. Эпштейном [4], изданная в 2022 году, в рамках заданной тематики актуализирует некоторые данные по вышеупомянутым программным пакетам.

¹⁸ В публикации Е.А. Чекмаревой [9] приведён подробный обзор существующих социально-экономических агент-ориентированных моделей, но также затрагиваются вопросы их реализации и используемых программных пакетов, а в заключение сформулированы проблемы, затрудняющие внедрение AOM в государственное муниципальное управление.

¹⁹ Вышеперечисленные работы безусловно внесли большой вклад в выявление и описание как глобальных трендов развития, так и нишевых решений для конкретной отрасли, однако, во-первых, не дают глобальной картины, ограничиваясь лишь самыми популярными программными продуктами, а во-вторых, могут не отражать некоторые современные подходы к агент-ориентированному моделированию.

²⁰

Неподдерживаемое программное обеспечение

Программы, которые по состоянию на момент написания статьи не имеют рабочего сайта, исходный код которых недоступен, либо сам программный продукт больше не продаётся, будем считать «заброшенными» (более точный англоязычный термин – abandonware, см. [21]). К сожалению, такое происходит в случае непродления аренды серверов, окончания работы сотрудника, занимавшегося этой проблематикой в организации и других причин, но это никак не уменьшает заслуги исследователей, вложивших много сил в такие программы. Зачастую некоторые неподдерживаемые программы содержат довольно интересные решения, которые являются актуальными при решении специфических задач. Программы же, которые были разработаны в эпоху, когда компьютеры обладали меньшей производительностью, демонстрируют гораздо большую эффективность использования вычислительных ресурсов и памяти нежели чем программы, написанные для самых современных компьютеров.

²¹ Для каждой такой программы, по возможности, были найдены сохранённые архивные копии веб-сайта и файлов в интернет-архиве. Программы, у которых известно лишь наименование в виде ссылки из какой-либо работы, но публикации и архивные копии веб-сайтов отсутствуют в дальнейшем рассматриваться не будут. Собранные данные представлены в Таблице 1. В качестве ссылки приведён адрес через интернет-архив Wayback Machine

(цифровой архив информации из Интернета, который сохраняет содержимое веб-сайтов [3]).

22 **Таблица 1. Список неподдерживаемого программного обеспечения**

Название и ссылки

- 1 Agent Cell >>>> >>>> >>>>
- 2 AgentFactory >>>>
AgentPolis
- 3 <https://web.archive.org/web/20170930023420/http://agents.fel.cvut.cz/projects/agent>
(сайт и публикации)
- 4 Brahms >>>>
- 5 Cougaar >>>>
- 6 CybelePro >>>>
- 7 D-OMAR >>>>
- 8 Echo >>>>
- 9 ExtendSim >>>>
- 10 GLIDER >>>>
- 11 HLA_Agent >>>>
- 12 IDEA <https://web.archive.org/web/20170112122151/http://www.ka.riec.tohoku.ac.jp/>
- 13 MASS Сайт: >>>>
- 14 MIMOSE >>>>
- 15 MOBIDYC >>>>
- 16 PedSim Сайт: <https://web.archive.org/web/20201021213340/http://pedsim.silmaril.org/>
>>>>
- 17 SeSAm >>>>
- 18 VisualBots >>>>

23

Программное обеспечение общего назначения

Существующие на сегодняшний день реализации агент-ориентированных моделей можно разделить на две категории. Первая – это интегрированные среды разработки (IDE) для построения АОМ с возможностями для проведения различных экспериментов с этими моделями. Вторая – это реализация непосредственно той или иной АОМ, которая не предусматривает универсальности, однако предусматривает необходимые инструментальные средства для проведения экспериментов с этой моделью. Как правило, большие и сложные экономические модели относятся ко второй категории, но их довольно мало по сравнению с первой категорией.

24 На основе источников, перечисленных выше в этой главе, а также собственных результатов поиска приведём сводную таблицу (см. Таблица 2) с

обзором ПО общего назначения для агент-ориентированного моделирования, в которой для каждой программы укажем:

- 25 1. Адрес сайта, адрес исходных кодов и/или адрес списка публикаций, если они доступны.
2. Используемые технологии (язык программирования, среда разработки, технологии визуализации).
3. Грубую оценку масштаба моделей, разработанных с помощью такой платформы («большой», «средний», «мелкий»).
4. Дата последнего обновления сайта / программного обеспечения.

26 **Таблица 2.** Список систем агент-ориентированного моделирования общего назначения, упорядоченный по алфавиту.

	Название и ссылки	Технологии	Год последнего обновления	Масштабируемость
1	AnyLogic >>>>	Java	2022	Средняя
2	Ascape Сайт: >>>> Код: >>>>	Java	2011	Средняя
3	Eve Java, Eve Javascript >>>>	Java, JavaScript, Node.JS Web browser	2015	Средняя
4	Janus Сайт: >>>> >>>> Код: >>>>	Java, SARL	2007-2020	Средняя
5	JAS-mine >>>>	Java	2022	Высокая
6	jES (Swarm на Java) >>>>	Java	2016	Средняя
7	MASON, GeoMASON Сайт: >>>> Код: >>>>	Java	2022	Средняя
8	Mesa >>>> >>>>	Python 3+	2022	Средняя
9	Mimosa >>>>	Java	2014	Средняя
10	NetLogo Сайт: >>>> Код: >>>> Публикации: >>>>	Scala	2022	низкая
11	Repast for .NET	C#	?	средняя
12	Repast for Java >>>>	Java		Средняя
13	Repast for Python >>>>	Python	2021	Средняя
14	Repast Simphony >>>>	Java	2022	Средняя
15	Scratch >>>>	Squeak	2022	Средняя
16	SEAS >>>>	C++	2020	Средняя
17	SimSketch >>>>	Java	2022	низкая
18	Simul8 >>>>	Графический редактор	2022	низкая

27

Распределённые и высокопроизводительные системы

В мире уже давно наметился тренд на создание всё больших по масштабу агент-ориентированных моделей, и аппаратное обеспечение обычных компьютеров не всегда справляется с возлагаемой на них задачей. Например, сейчас уже созданы модели целых стран и даже союзов, а это – десятки и сотни миллионов агентов. В таких случаях часто используются параллельные и распределённые вычисления, с

помощью собственных разработок, либо специализированного программного обеспечения. Список такого программного обеспечения со ссылками на сайт, исходные коды (если они опубликованы), используемые в программе технологии и год последнего обновления представлен в Таблица 3.

28 **Таблица 3.** Список высокопроизводительных и распределённых систем

	Название и ссылки	Технологии	Год последнего обновления
1	EcoLab Сайт: >>>> Код: >>>>	C++	2022
2	FLAME и FLAME GPU Сайт: >>>> и >>>> Код: >>>>	C, C for CUDA, OpenGL	2021
3	GridABM Сайт: >>>> Публикации: >>>>	Java	2010
4	HLA_RePast >>>>	Java	2010
5	MATSim Сайт: >>>> Код: >>>>	Java	2022
6	Pandora Сайт: >>>> Код: >>>>	C++ / Python	2018
7	PDES-MAS >>>> (сайт и публикации)	C++	2010
8	Repast for HPC Сайт: >>>> Код: >>>>	C++, MPI	2021
9	Swarm >>>>	Java, Objective-C	2017

29

Специализированное программное обеспечение

Остальное программное обеспечение создано для решения задач в одной или нескольких смежных областях, например социодемографическое моделирование и экономика. Данные о таких программах приведены в Таблица 4.

30 **Таблица 4.** Специализированное программное обеспечение

	Название и ссылки	Технологии	Год последнего обновления	Масштабируемость
1	ADEVs Сайт: >>>> Код: >>>>	C++	2015	Высокая
2	AgentScript >>>>	JavaScript, web browser	2022	Низкая
3	AgentSheets >>>>	Java	2022	Низкая
4	Altrev Adaptive Modeler >>>>	.NET	2021	Средняя
5	AOR Simulation >>>>	Java	2014	Средняя
6	BehaviourComposer >>>>	Java, Google Web Toolkit, NetLogo	2022	Средняя
7	Breve >>>> /s	C++, OpenGL	2015	Средняя
8	Breve.JS Сайт: >>>> Код: >>>>	Javascript	2018	Средняя
9	BSim Сайт: >>>> Код: >>>>	Java	2017	Средняя
10	CloudSim Сайт: >>>> Код: >>>>	Java	2013	Средняя
11	Cormas >>>>	Smalltalk	2022	Средняя
12	CRAFTY Сайт: >>>> Код: >>>>	Java	2015	Средняя
13	DigiHive Сайт: >>>> Публикации: >>>>	C++, Microsoft Visual Studio	2022	Средняя
14	Envision >>>>	C++, Microsoft Visual Studio	2022	Средняя

15	FlexSim >>>>	.NET, OpenGL	2022	Средняя
16	Framsticks Сайт: >>>> Код: >>>>	Java, Python, OpenGL	2022	Средняя
17	GAMA Сайт: >>>> Код: >>>>	Java, OpenGL	2022	Средняя
18	GALATEA Сайт: >>>> Публикации: >>>>	Java	2007	Средняя
19	GROWLab Сайт: >>>> Публикации: >>>>	Java	2018	Средняя
20	Insight Maker Сайт: >>>> Код: >>>>	JavaScript, Node.JS	2010-2022	Средняя
21	JAMEL Сайт: >>>> Код: >>>> Публикации: >>>>	Java	2016	Средняя
22	JAMSIM Код: >>>> Публикации: >>>>	Java, R	2017	Средняя
23	Java Auction Simulator (JASA) >>>>	Java, Spring, JABM	2016	Средняя
24	JCASim >>>>	Java	2009	Низкая
25	jES (Swarm на Java) >>>>	Java	2016	Средняя
26	LSD Сайт: >>>> Код: >>>>	C++, Tcl/Tk, Gnuplot	2020	Средняя
27	MACSimJX Сайт: >>>> Публикации: >>>>	C++	2009	Средняя
28	MASyV Сайт: >>>> Публикации: >>>>	C	2008	Средняя
29	Mathmatica Wolfram >>>>	Wolfram, C/C++, Java, Mathematica	2022	Средняя
30	Mobility Testbed (на основе AgentPolis) Сайт и код: >>>> Публикации: >>>>	Java	2014	Средняя
31	Modgen >>>>	Visual Studio 2017	2021	Средняя
32	OBEUS >>>>	.NET	2005 ?	низкая
33	PS-I Сайт: >>>>	C	2020 (2012)	
34	SimAgent (SIM_AGENT) >>>>	Poplog, Pop-11	2016	Средняя
35	SimBioSys >>>>	C++		Средняя
36	SimEvents от MathWorks >>>>	C, C++, Java, MATLAB	2022	Средняя
37	Simio >>>>	C#	2022	средняя
38	SimJr >>>>	Java		Средняя
39	SimSketch >>>>	Java	2022	низкая
40	Simul8 >>>>	Графический редактор	2022	низкая
41	SOARS Сайт: >>>> Код: >>>>	Java	2021	?
42	StarLogo Nova (основан на StarLogo TNG) >>>>	Java/YoYo	2022	низкая
43	StarLogo TNG >>>>	OpenGL		Средняя
44	Sugarscape (автор kannankeril) >>>>	Java	2005	низкая
45	Sugarscape (автор Zhaotian Wang) Сайт: >>>> Код: >>>>	JavaScript	2015	низкая

46	Sugarscape (автор Nick Tyson) Сайт и код: >>>>	C#	2015	низкая
47	Sugarscape (автор Hervé Lange) Сайт и код: >>>>	Python	2014	низкая
48	SugarscapeR (автор Georgi Demirev) Сайт и код: >>>>	R	2018	низкая
49	TerraME Сайт и публикации: >>>>	C++, Lua	2020	низкая
50	UrbanSim >>>>	Python	2020	
51	VSEit >>>> >>>>	Java	2006	Средняя
52	Xholon >>>>	Java, XML	2007	Средняя

31

Языки программирования

По языкам программирования системы моделирования распределяются следующим образом (см. Рис. 1).

32

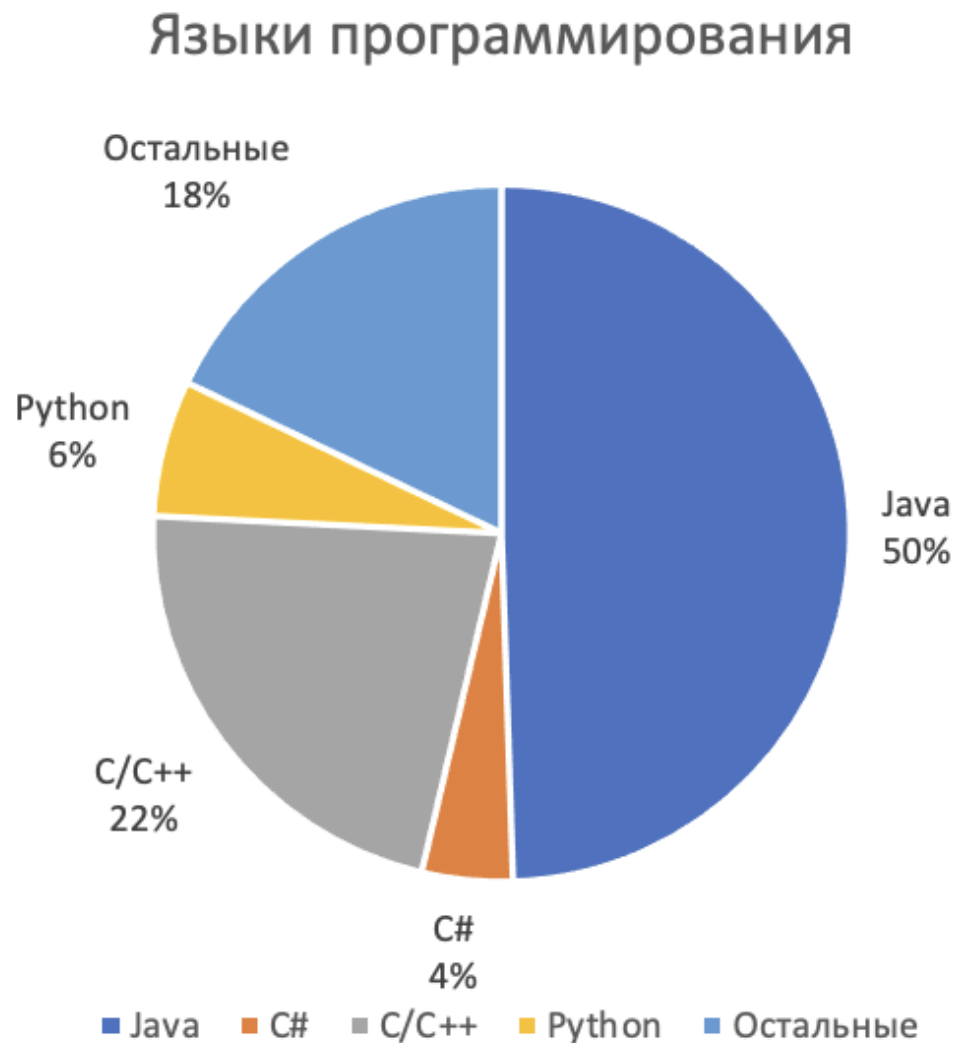


Рис. 1. Распределение языков программирования систем АОМ

33

Очевидно, что лидером является язык Java, за ним следуют проекты на языке C или C++, и лишь 6% и 4% написаны на Python и C# соответственно.

34 Популярность (используемость) языков программирования в агент-ориентированном ПО по годам показана на Рис. 2.

35



Рис. 2. Частота использования языка программирования в зависимости от времени.

36 В данном случае под годом подразумевается последний год активной работы над программой, например в 2015 году было 3 программы на Java, одна на C/C++, одна на C# и две на других языках программирования. Из этого распределения можно видеть, что Java довольно равномерно распределена по годам, и остается лидером в использовании и на сегодняшний день. Но, также отмечается возросшая доля C# в программах, разработка и поддержка которых сейчас продолжается, а также почти равные доли C/C++ и других языков (в которые включён JavaScript). Несмотря на рост популярности языка Python в индустрии в целом, он не нашёл активного применения в агент-ориентированном моделировании.

37 Разнообразие используемых языков при разработке программного обеспечение для АОМ можно частично объяснить необходимостью соблюдения баланса между удобством использования, быстротой разработки и производительностью. Как правило, чем «удобнее» язык программирования (например отсутствие типизации в Python, автоматическое освобождение ненужной памяти «сборщиком мусора» в языках типа C# и Java, и т. п.), тем выше «плата» за это в виде уменьшения производительности и увеличения требований к оперативной памяти. Дать сравнительную количественную оценку производительности языков программирования является довольно сложной задачей в силу того, что разные задачи можно по-разному реализовать в том или ином языке программирования. Например, в [17] приводится сравнение нескольких языков программирования по одной из видов операций (см. Рис. 3).

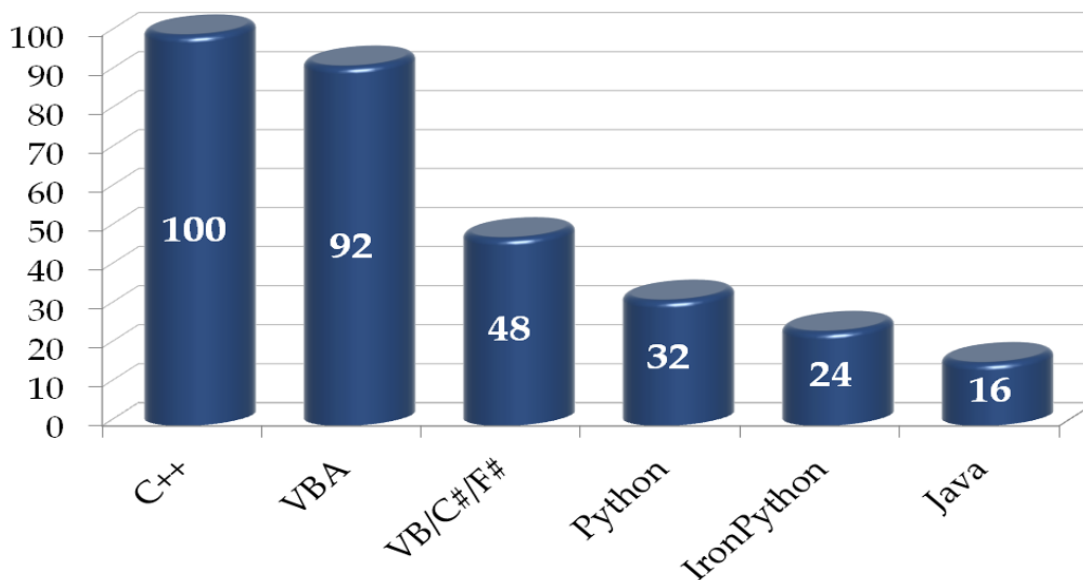


Рис. 3. Нормированное значение производительности по выполнению операции ShapeCopy с помощью различных языков программирования.

В работе [11] для сравнения языков программирования используется довольно распространённая по мнению авторов статьи, вычислительная задача в макроэкономике, а именно неоклассическая стохастическая модель роста. Лучшим по производительности оказывается язык C++, Java медленнее в 2.1 раза, а Python в 45.16 раз. Наиболее актуальные данные приводятся в [20], где в качестве задачи используется программа построения множества Мандельброта, см. Рис. 4.

40

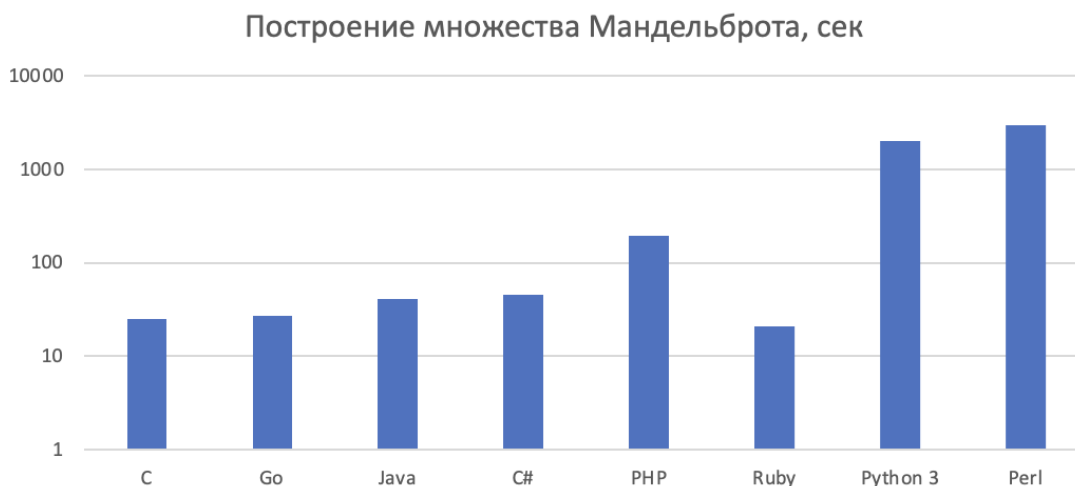


Рис. 4. Скорость построения множества Мандельброта на разных языках программирования.

41

Заключение

В этой статье приводится обзор состояния отрасли агент-ориентированного и имитационного моделирования и собраны наиболее полные данные о существующем, а также более не поддерживаемом программном обеспечении для АОМ. Общий список всего ПО насчитывает 95 различных программ. Для каждого

программного продукта приводятся адрес его сайта в интернете с актуальной версией, либо ссылка на интернет-архив с последней рабочей версией этого программного обеспечения, ссылка на исходный код, если он доступен под какой-либо лицензией, а также различная дополнительная информация. Все программные продукты разделены на несколько категорий, в зависимости от предметной области, но такое разделение несколько условно, поскольку существуют программные продукты, предназначенные сразу для нескольких областей (например, социодемографическое моделирование часто сочетается с экономическим моделированием).

⁴² Этот обзор может быть полезен для быстрой оценки существующих программных средств АОМ и как помощник в подборе нужного инструмента для выполнения имеющихся исследовательских и прикладных задач. Детальное описание каждого программного продукта, а также более глубокие обзоры по специализированным областям агент-ориентированного моделирования более целесообразно опубликовать в виде отдельных работ. Особо стоит отметить ПО для моделирования на суперкомпьютерах и вообще суперкомпьютерные массово-параллельные модели. Учитывая всё большую популярность параллельных моделей их обзор заслуживает отдельной статьи.

Библиография:

1. Бахтизин А.Р. Агент-ориентированные модели экономики М.: Экономика, 2008. 279 с.
2. Борщев, А.В. Имитационное моделирование: состояние области на 2015 год, тенденции и прогноз // ИММОД 2015. URL: http://www.anylogic.ru/upload/pdf/immod15_borshchev_statia.pdf
3. Интернет архив: Wayback Machine // URL: <https://archive.org/index.php>
4. Макаров В.Л., Бахтизин А.Р., Эпштейн Дж. Агент-ориентированное моделирование для сложного мира: монография М.: МАКС Пресс, 2022. – 88 с.
5. Макаров В.Л., Бахтизин А.Р., Сушко Е.Д. Имитация особенностей репродуктивного поведения населения в агент-ориентированной модели региона // Экономика региона. 2015, № 3.
6. Макаров В.Л., Бахтизин А.Р. Социальное моделирование – новый компьютерный прорыв (агент-ориентированные модели) Москва : Экономика, 2013. – 295 с.
7. Сушко Е.Д. Мультиагентная модель региона: концепция, конструкция и реализация [Текст] : препринт. М. : ЦЭМИ РАН, 2012. 54 с.
8. Фаттахов М.Р. Агент-ориентированная модель социально-экономического развития мегаполисов: автореф. дис. на соиск. уч. ст. к.э.н. : 08.00.13. М., 2011. 30 с.

9. Чекмарева Е.А. Обзор российского и зарубежного опыта агент-ориентированного моделирования сложных социально-экономических систем мезоуровня // Экономические и социальные перемены: факты, тенденции, прогноз. 2016, № 2(44). DOI 10.15838/esc.2016.2.44.14. – EDN VXBIAB.
10. Abar S., Theodoropoulos G.K., Lemarinier P., O'Hare G. M. Agent Based Modelling and Simulation tools: A review of the state-of-art software // Computer Science Review. 2017, Vol. 24.
11. Aruoba S.B., Fernandez-Villaverde J. A comparison of programming languages in macroeconomics // Journal of Economic Dynamics and Control. 2015, Vol. 58.
12. Allan R.J. Survey of agent based modelling and simulation tools, Technical Report: DL-TR-2010-007, Version 1.1, Science and Technology Facilities Council (STFC) Daresbury Laboratory, Daresbury, Warrington, WA44AD, 2010.
13. Bandini S., Manzoni S., Vizzari G. Agent based modeling and simulation: an informatics perspective // Journal of Artificial Societies and Social Simulation. 2009, Vol. 12, №. 4.
14. Bonabeau E. Agent-based modeling: Methods and techniques for simulating human systems // Proceedings of the national academy of sciences. 2002, Vol. 99, №. suppl 3.
15. Bordini R.H., Braubach L., Dastani M., Seghrouchni A.E.F., Gomez-Sanz J.J., Leite J., O'Hare G.M.P., Pokahr A., Ricci A. A survey of programming languages and platforms for multi-agent systems, Informatica-(Ljubl.) 30 (1) (2006) 33–44.
16. Castle C.J.E., Crooks A.T. Principles and concepts of agent-based modelling for developing geospatial simulations, Working paper #110, Centre for Advanced Spatial Analysis (UCL), London, UK. 01, 2006.
17. Cederholm, Mark. Using ArcObjects in Python. UniSource Energy Services. 2010 ESRI Developer Summit, March 22-25, Palm Springs, CA
18. Epstein J.M, Axtell R. Growing artificial societies: social science from the bottom up. –Brookings Institution Press, 1996.
19. Gilbert N. Agent-based models. Sage Publications Inc., 2008. 112 p.
20. Gouy, Isaac. The Computer Language Benchmarks Game. URL: <https://benchmarksgame-team.pages.debian.net/benchmarksgame/performance/simple.html> , 2022.
21. Gupta R., Kansal G. A survey on comparative study of mobile agent platforms, Int. J. Eng. Sci. Technol. 3 (3) (2011) 1943–1948.
22. Khong D. W. K. Orphan works, abandonware and the missing market for copyrighted goods // International Journal of Law and Information Technology. 2007, Vol. 15, №. 1.

23. Kravari K., Bassiliades N. A survey of agent platforms // JASSS. 2015, 18 (1)
24. Krebs F., Ernst A. A spatially explicit agent-based model of the diffusion of green electricity: Model setup and retrodictive validation, in: Proceedings of the Eleventh Social Simulation Conference, 2015.
25. Makarov V.L., Bakhtizin A.R., Epstein J.M. Agent-based modeling for a complex world. – 2nd edition, revised. – M.: Scientific publications department, GAUGN, 2022. – 74 p.
26. Negahban A., Yilmaz L. Agent-based simulation applications in marketing research: An integrated review // J. Simul. 2014, 8 (2)
27. Nguyen G., Dang T.T., Hluchy L., Balogh Z., Laclavik M., Budinska I. Agent Platform Evaluation and Comparison, Rapport Technique, Institute of Informatics, Slovak Academy of Sciences, 2002.
28. Niazi M.A., Hussain A. Agent-based tools for modeling and simulation of selforganization in peer-to-peer, ad hoc, and other complex networks: A practical guide for network designers and developers, IEEE Commun. Mag. 47 (3) (2009) 166–173.
29. Nikolai C., Madey G. Tools of the trade: A survey of various agent based modeling platforms // JASSS. 2009, 12 (2)
30. Railsback S.F., Lytinen S.L., Jackson S.K. Agent-based simulation platforms: review and development recommendations, Simulation 82 (9) (2006) 609–623.
31. Rousset A., Herrmann B., Lang C., Philippe L. A survey on parallel and distributed multi-agent systems for high performance computing simulations, Comput. Sci. Rev. 22 (2016) 27–46.
32. Reynolds C. Computer Graphics. – 1987.
33. Serenko A., DeGroote M.G. Agent toolkits: a general overview of the market and an assessment of Instructor satisfaction with utilizing toolkits in the classroom, Working Paper #455, School of Business, McMaster University, Canada, 2002.
34. Theodoropoulos G., Minson R., Ewald R., Lees M. Simulation engines for multiagent systems, in: A.M. Uhrmacher, D. Weyns (Eds.), Multi-Agent Systems: Simulation and Applications, Taylor and Francis, 2009, pp. 77–108.
35. Tobias R., Hofmann C. Evaluation of free Java-libraries for social-scientific agent-based simulation // JASSS. 2004, 7 (1)
36. Wikipedia: Comparison of agent-based modeling software. // URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Comparison_of_agent-based_modeling_software
37. Zhou Z., Chan W.K., Chow J.H. Agent-based simulation of electricity markets: a survey of tools, Artif. Intell. Rev. (2007) 305–342.

Modern Software tools for Agent-based modeling

Alexey Bragin

*Central Economics and Mathematics Institute of the Russian Academy of Sciences
Russian Federation, Moscow*

Albert Bakhtizin

*Central Economics and Mathematics Institute of the Russian Academy of Sciences
Russian Federation, Moscow*

Valery Makarov

*Central Economics and Mathematics Institute of the Russian Academy of Sciences
Russian Federation, Moscow*

Abstract

The article describes the current state of the industry of software tools for creating agent-based models, conducting agent-based simulation and processing the results of such modeling. Despite the large number of articles on various problems in the field of agent-based modeling and reviews of some software tools, only one comprehensive English-language work on this issue was published in 2017. Publications in recent years do not fully reflect the state of the industry, there are practically no reviews in Russian. This work is devoted to a review of agent-based and simulation modeling tools with a brief description of them.

Keywords: agent-based modeling, software, simulation, JAVA, C#

Date of publication: 18.12.2022

Citation link:

Bragin A., Bakhtizin A., Makarov V. Modern Software tools for Agent-based modeling
// Artificial societies. 2022. Vol. 17. Issue 4.

URL: <https://artsoc.jes.su/s207751800023501-0-1/> DOI: 10.18254/S207751800023501-0