

ПРОБЛЕМЫ СТАНДАРТИЗАЦИИ ОПИСАНИЯ АГЕНТ-ОРИЕНТИРОВАННЫХ МОДЕЛЕЙ И ВОЗМОЖНЫЕ ПУТИ ИХ РЕШЕНИЯ

© 2023 г. В. Л. Макаров^{a,*}, А. Р. Бахтизин^{a,**}, Е. А. Россошанская^{b,***},
Т. А. Дорошенко^{b,****}, Н. А. Самсонова^{b,*****}

^aЦентральный экономико-математический институт РАН, Москва, Россия

^bВосточный центр государственного планирования, Москва, Россия

*E-mail: makarov@cemi.rssi.ru

**E-mail: albert.bakhtizin@gmail.com

***E-mail: e.rossoshanskaya@vostokgosplan.ru

****E-mail: t.doroshenko@vostokgosplan.ru

*****E-mail: n.samsonova@vostokgosplan.ru

Поступила в редакцию 17.02.2023 г.

После доработки 28.03.2023 г.

Принята к публикации 05.04.2023 г.

В статье поднимается проблема стандартизации описания агент-ориентированных моделей, подробно изучается зарубежный опыт решения проблемы и предлагаются авторские разработки. В процессе исследования проведён критический анализ имеющихся стандартов (оригинального ODD-протокола, его обновлений и модификаций); предложен адаптированный перевод ODD-протокола для использования в русскоязычных публикациях; обоснована необходимость разработки отдельного стандарта для описания агент-ориентированных моделей, предназначенных для апробации управленческих решений; предложена структура стандарта и описаны перспективы его применения. Научная новизна и практическая значимость исследования заключаются в разработке и обосновании первого русскоязычного стандарта описания агент-ориентированных моделей, учитывающего отечественный опыт, терминологию и лучшие образцы описания моделей, а также в предложении создать открытый реестр прикладных моделей, обеспечивающий взаимодействие с потенциальными пользователями разрабатываемых научными коллективами агентных систем поддержки принятия решений.

Ключевые слова: агент-ориентированное моделирование, стандартизация, ODD-протокол, поддержка принятия решений.

DOI: 10.31857/S0869587323040059, **EDN:** SCIOKT

Наблюдаемое с начала XXI в. активное применение агент-ориентированного моделирования для исследования и прогнозирования поведения мультиагентных систем привело к многократно-

МАКАРОВ Валерий Леонидович – академик РАН, научный руководитель ЦЭМИ РАН. БАХТИЗИН Альберт Рауфович – член-корреспондент РАН, директор ЦЭМИ РАН. РОССОШАНСКАЯ Елена Андреевна – кандидат экономических наук, ведущий эксперт-аналитик ФАНУ “Востокгосплан”. ДОРОШЕНКО Татьяна Андреевна – руководитель сектора “Моделирование социально-демографических процессов” ФАНУ “Востокгосплан”. САМСОНОВА Наталья Александровна – руководитель сектора “Стратегическое развитие” ФАНУ “Востокгосплан”.

му росту числа публикаций на данную тему. Анализ статистики Google Scholar показывает, что последние десять лет в этой системе научных публикаций ежегодно появлялось более четырёхсот новых научных статей, содержащих в заголовке термин “agent-based model” (рис. 1). Согласно данным электронной научной библиотеки eLibrary, только в российских научных журналах за прошедший 2022 г. опубликовано свыше 20 статей, в названиях которых используются понятия агент-ориентированной модели или агент-ориентированного моделирования, хотя всего 15 лет назад научные публикации по данной теме в нашей стране ограничивались монографией “Агент-ориентированные модели экономики” [1]

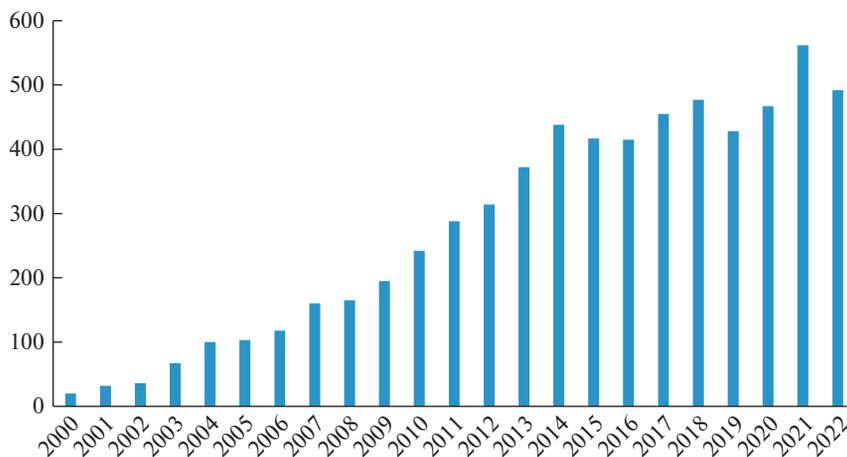


Рис. 1. Число статей в Google Scholar с заголовком “agent-based model” по году выпуска. Источник: составлено авторами на основе расширенного поиска на сайте scholar.google.com

и несколькими статьями учёных ЦЭМИ РАН. Сейчас агентные имитационные модели строят не только в столице, но и в Новосибирске [2], Уфе [3], Екатеринбурге [4], Орле [5], Вологде [6] и многих других городах России.

С каждым годом число исследований в области агент-ориентированного моделирования нарастает и рецензентам становится всё труднее отсеивать качественные работы, заслуживающие внимания, от материалов недобросовестных авторов, пытающихся подняться на волне популярности агент-ориентированного моделирования. Кроме того, стремительный рост числа публикаций при существенно различающемся стиле изложения и порядке представления результатов исследования значительно затрудняет поиск родственных проектов, сравнительный анализ разработанных моделей, использование уже накопленного другими исследователями опыта, по сути — преемственность работ, а значит, и развитие самой науки. Проанализировать такое количество публикаций просто физически невозможно. В сложившихся условиях возникает острая потребность в едином, общепризнанном языке описания агент-ориентированных моделей, которым по мнению научного сообщества, может стать стандартизированный ODD-протокол, впервые предложенный широкой публике в 2006 г. [7]. Именно ему за рубежом сейчас отводят роль *lingua franca*¹ для общения специалистов по АОМ со всего мира [8].

¹ *Lingua franca* — функциональный тип языка, используемый в качестве средства общения между носителями разных языков в ограниченных сферах социальных контактов. Буквально — “язык франков” — средневековый смешанный язык, использовавшийся народами средиземноморских стран.

Востребованность ODD-протокола подтверждается значительным ростом числа статей и книг, использующих данный стандарт для описания построенных моделей [9]. К примеру, в монографии “Agent-Based Modelling in Economics” [10] описание всех 19 авторских моделей осуществляется на основе сокращённого ODD-протокола и сопровождается псевдокодом, что позволяет читателям понять принципы работы и устройство модели, не имея специальных знаний в области программирования.

В то же время в российских научных публикациях протокол, за редкими исключениями, по-прежнему практически не используется [11]. Причины, по которым готовые решения, разработанные за рубежом, не находят широкого применения в России, могут быть весьма разнообразными, начиная от незнания иностранного языка и неосведомлённости о существовании стандарта в связи с отсутствием его русскоязычной адаптации и заканчивая недостатками самого протокола и сознательным нежеланием его использовать. В связи с этим как никогда актуальным для дальнейшего развития агент-ориентированного моделирования в нашей стране становится выявление проблем стандартизации описания разработанных моделей, а также поиск и обоснование путей их решения.

В данной статье мы ставим перед собой следующие задачи:

- провести критический анализ имеющихся стандартов (протоколов);
- предложить их адаптацию для русскоязычных публикаций;
- обосновать необходимость разработки отдельного стандарта для описания АОМ, предназначенных для апробации управленческих решений;

- предложить структуру стандарта;
- описать перспективы его применения.

ИСТОРИЯ СТАНДАРТИЗАЦИИ ОПИСАНИЯ АГЕНТ-ОРИЕНТИРОВАННЫХ МОДЕЛЕЙ

Первая версия ODD-протокола, самого известного и востребованного в настоящий момент стандарта описания агент-ориентированных моделей, была разработана в 2006 г. группой из 28 учёных-экологов, представлявших восемь стран мира (Германия, Норвегия, Франция, Великобритания, Нидерланды, Израиль, США и Канада), и опубликована в журнале “Ecological Modelling” [7]. Оригинальный протокол состоял из следующих семи частей, задающих рекомендованный для научных публикаций порядок описания моделей:

1. Цель.
2. Переменные и шкалы.
3. Обзор процессов и порядка их реализации.
4. Принципы построения.
5. Установка стартового состояния.
6. Ввод.
7. Подмодели (табл. 1).

Названием протокола послужила аббревиатура, точнее акронимом, трёх слов, отражающих его основные структурные блоки: overview – обзор (части 1–3); design concepts – принципы построения (часть 4); details – подробности (части 5–7).

Основная идея создания протокола состояла в том, чтобы побудить авторов структурировать описание моделей в одной и той же последовательности, соблюдая следующую логику изложения: сначала читателю предоставляется контекст и общая информация о модели (цель, переменные, шкалы, процессы), затем раскрываются концептуальные основы моделирования (принципы построения: эмерджентность, адаптация, способность к обучению и прогнозированию, стохастичность и др.) и только потом описываются технические детали (установка стартового состояния, ввод данных, подмодели).

Следует отметить, что ODD-протокол 2006 г. – это не первая попытка стандартизации описания АОМ. В опубликованной годом ранее в Принстонском университете монографии “Individual-Based Modeling and Ecology” двое из будущих создателей ODD-протокола В. Гримм и С.Ф. Рейлсбэк уже предлагали семикомпонентный протокол PSPC+3, название которого составлено из начальных букв первых четырёх основополагающих элементов предлагаемого стандарта: purpose – цель, structure – структура, process – процессы, concepts – принципы. Именно данный стандарт после его обсуждения, переработки и переимено-

вания разделов лёг в основу получившего известность ODD-протокола [12].

Как позже признавались разработчики [13], первое время ни один из инициаторов создания ODD-протокола не был полностью убеждён в преимуществах его применения. Поэтому каждый из них стал тестировать стандарт на собственных статьях [14] и лекциях. В результате учёные пришли к выводу о полезности использования протокола не только для описания моделей, но и для улучшения методики обучения студентов агент-ориентированному моделированию.

Несомненными преимуществами стандартизированного описания моделей стали:

- упрощение и ускорение процесса описания моделей: авторам больше не нужно тратить время на структурирование текста, а можно просто следовать шаблону;
- более полное описание моделей и сокращение количества ошибок: протокол напоминает авторам о важных деталях, которые нужно не забыть включить в текст;
- более понятное описание моделей и ускорение рассмотрения статей: процесс рецензирования стал более гладким, снизилось количество вопросов и замечаний [7].

Однако наряду с преимуществами протокола в процессе его использования были выявлены и недостатки или недоработки, подтолкнувшие разработчиков к обновлению стандарта сначала в 2010-м (first update), а затем в 2020 г. (second update).

Первое обновление [13] было связано с тем, что анализ 54 статей, использовавших ODD после его публикации, показал некорректное или неполное применение протокола в 25% случаев. Ирония состоит в том, что стандарт, призванный сделать описание моделей более понятным, сам оказался непонятным части исследователей. С другой стороны, высокая доля статей с полным и почти корректным использованием протокола (75%) была воспринята разработчиками как несомненное доказательство ценности предложенного стандарта для научного сообщества и отсутствия необходимости в его существенных изменениях. Цель первого обновления – сделать стандарт более понятным и применимым для широкого круга агент-ориентированных моделей из разных областей знания.

Для достижения поставленной цели были расширены названия частей 2 и 6 (см. табл. 1), в части 4 добавлены подразделы “Основные принципы” и “Способность к обучению”, а характеристика для экологических моделей “Приспособленность организма к окружающим условиям” (fitness) переименована в более общее понятие “Целевые установки” (objectives), которые могут описываться как функциями полезности для экономи-

Таблица 1. Структура ODD-протоколов разных лет (адаптированный перевод)

Структурный блок (block)	Структурный элемент (element)	Версия протокола		
		ODD 2006 (original protocol)	ODD 2010 (first update)	ODD 2020 (second update)
Обзор (overview)	1. Цель (purpose)	+	+	–
	1. Цель и шаблоны (purpose and patterns)	–	–	+
	2. Переменные и шкалы (state variables and scales)	+	–	–
	2. Объекты, переменные и шкалы (entities, state variables, and scales)	–	+	+
	3. Обзор процессов и порядка их реализации (process overview and scheduling)	+	+	+
Принципы построения модели (design concepts)	4. Принципы построения (design concepts)			
	Базовые принципы (basic principles)	–	+	+
	Эмерджентность (emergence)	+	+	+
	Адаптация (adaptation)	+	+	+
	Приспособленность (fitness)	+	–	–
	Целевые установки/стремления (objectives)	–	+	+
	Способность к обучению (learning)	–	+	+
	Способность к прогнозированию (prediction)	+	+	+
	Восприятие информации (sensing)	+	+	+
	Взаимодействие между агентами (interaction)	+	+	+
	Стохастичность (stochasticity)	+	+	+
	Коллективные типы агентов (collectives)	+	+	+
Подробности технической реализации (details)	5. Установка стартового состояния (initialization)	+	+	+
	6. Ввод (input)	+	–	–
	6. Входные данные (input data)	–	+	+
	7. Подмодели (submodels)	+	+	+

Источник: составлено авторами по: *Grimm V., Berger U., Bastiansen F. et al.* A standard protocol for describing individual-based and agent-based models // *Ecological Modelling*. 2006. V. 198. № 1–2. P. 115–126; *Grimm V., Berger U., DeAngelis D.L. et al.* The ODD protocol: a review and first update // *Ecological modelling*. 2010. V. 221. №. 23. P. 2760–2768; *Grimm V., Railsback S.F., Vincenot C.E. et al.* The ODD protocol for describing agent-based and other simulation models: A second update to improve clarity, replication, and structural realism // *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*. 2020. V. 23. №. 2. <http://jasss.soc.surrey.ac.uk/23/2/7.html>. doi:10.18564/jasss.4259

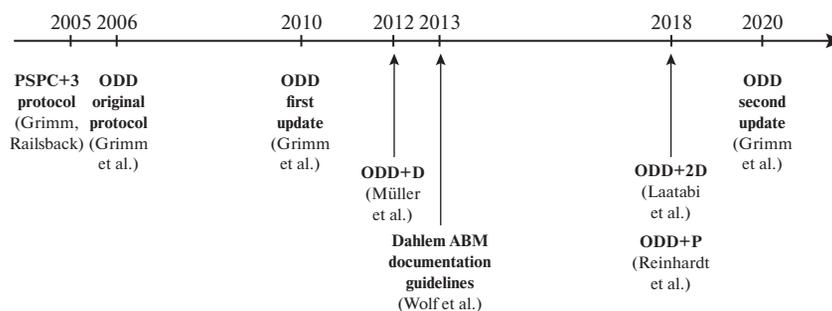


Рис. 2. История развития ODD-протокола в хронологическом порядке. Источник: составлено авторами.

ческих моделей, так и менее формализованными критериями в других случаях [15]. Кроме того, изменения коснулись и подачи материала: в обновлённом ODD-протоколе каждый элемент сопровождался пояснениями и вопросами, на которые должен ответить автор при описании своей модели, что обеспечило более корректное использование протокола и являлось его несомненным достоинством по сравнению с предыдущей версией.

Второе обновление [8] стало более масштабным по количеству предлагаемых авторам инструкций и руководств по составлению различного вида стандартизированных описаний АОМ и призвано восполнить недостаток справочных материалов для корректного описания моделей, представление которых на основе полного ODD-протокола затруднено или нецелесообразно. В частности, авторами разработаны:

- стандарт сокращённого описания АОМ;
- стандарт описания вложенных моделей;
- стандарт описания модифицированных моделей и др.²

При этом базовая структура полного стандарта не изменилась: авторы поменяли только название первой части, добавив термин “шаблоны” для обеспечения связи с шаблонно-ориентированным моделированием (pattern-oriented modeling) [16], используемым преимущественно в экологии.

Основным достоинством последней версии протокола является наличие значительного количества примеров описания каждой из семи частей и контрольного списка ответов, которые должно давать описание модели по ODD-протоколу (checklist)³.

Таким образом, на данный момент существует три версии ODD-протокола, последняя из которых опубликована в 2020 г. Строго говоря, все другие стандарты описания АОМ, разработанные в настоящее время, не являются ODD-протоко-

лами, но чаще всего используют в своём названии эту аббревиатуру, поскольку в той или иной мере основаны на оригинальном протоколе, разработанном В. Гриммом и соавторами в 2006 г. В частности, нам известно по меньшей мере ещё четыре стандартизированных протокола описания агент-ориентированных моделей, это: ODD+D [17], ODD+2D [18], ODD+P [19] и Dahlem ABM documentation guidelines [20]. Хронология событий, связанных с появлением и развитием стандартов описания АОМ, схематично представлена на рисунке 2.

Протокол ODD+D (ODD + Decision) является адаптацией ODD-протокола для описания социально-экологических моделей, в которых центральную роль играют решения человека [21]. По сравнению с обновлённым протоколом 2010 г., расширенный протокол ODD+D включает больше вопросов, особенно в части “Принципы построения модели” и, как следствие, приводит к более объёмной документации. Поэтому авторы создали удобный шаблон для заполнения, минимизирующий дополнительные усилия, необходимые для перехода к ODD+D-протоколу. Пользователям, у которых уже есть описание модели в формате ODD, необходимо добавить: 1) описание пространственных аспектов в разделе “Обзор”; 2) ответы на дополнительные вопросы о теоретической и эмпирической основах исследования, подробное описание процесса принятия решений агентами и характеристику их гетерогенности в разделе “Принципы построения”; 3) общую информацию о программной реализации модели в разделе “Подробности” [22].

Главным достоинством ODD+D по сравнению с предшественниками является возможность табличного описания модели путём заполнения готового шаблона. Каждая строка таблицы соответствует одному из вспомогательных вопросов, на которые должен ответить автор для корректного описания модели. Вопросы объединены в семь ключевых частей, формирующих три смысловых блока протокола, давших ему название: “Overview”, “Design concepts”, “Details”.

² Дополнительные файлы S2–S4 к статье [8].

³ Электронное приложение S1 к протоколу доступно по ссылке: <http://jasss.soc.surrey.ac.uk/23/2/7/S1-ODD.pdf>.

Таблица 2. Структура разделов Далемского руководства (адаптированный перевод)

Обзор (Overview)	Принципы построения (Design concepts)	Техническая спецификация (Functional specification)
1. Обоснование	1. Время, схемы и модели поведения	1. Программное описание агентов и других объектов, их действий и взаимодействия
2. Агенты	2. Протоколы взаимодействия и информационные потоки	2. Установка стартового состояния
3. Другие объекты	3. Способность к прогнозированию	3. Ввод данных во время работы модели
4. Ограничения	4. Поведенческие допущения и принятие решений	
5. Взаимосвязи	5. Способность к обучению	
6. Действия	6. Динамика популяции	
	7. Уровни случайности	
	8. Прочие положения	

Источник: составлено авторами по: *Wolf S., Bouchaud J., Cecconi F. et al.* Describing economic agent-based models – Dahlem ABM documentation guidelines // *Complexity Economics*. 2013. № 2. P. 63–74.

Протокол ODD+2D (ODD + Decision + Data) основан на стандарте ODD+D и получен из него расширением части 6 “Входные данные” за счёт добавления четырёх новых пунктов: 1) обзор данных; 2) структура данных; 3) картирование данных; 4) шаблоны данных. Протокол предлагает набор правил описания эмпирических данных, присутствующих в модели, и позволяет автору структурировать и сохранить информацию о работе с данными, а читателю понять, как и какие данные используются, и при необходимости воспроизвести модель с теми же или новыми данными, что способствует научному диалогу и обмену опытом. Особенно важным является включение данного раздела в описание моделей, работающих с пространственными данными и картами [18].

Протокол ODD+P (ODD + Provenance) требует дополнять описание моделей информацией об их происхождении, то есть сведениями об исследователях, объектах и процессах, которые способствовали их созданию. По мнению разработчиков, раскрытие информации о том, как и почему была сделана модель, её обоснование, повышает доверие к качеству модели и надёжности результатов [19].

Ещё одним стандартом описания агент-ориентированных моделей, основанном на ODD-протоколе, авторы которого, однако, предпочли не использовать эту аббревиатуру в названии, является Далемское руководство по документированию АОМ (Dahlem ABM documentation guidelines) [20]. Руководство создано рабочей группой на 100-й конференции “Новые подходы в экономике после финансового кризиса” в Далеме и опубликовано в 2013 г. в журнале “Complexity Economics”. В разработке руководства приняли участие

11 учёных из разных стран мира, в том числе наш соотечественник Д.В. Ковалевский, специалист Международного центра по окружающей среде и дистанционному зондированию им. Нансена в г. Санкт-Петербурге.

Предлагаемая в руководстве структура описания модели, так же как и во всех других модификациях ODD-протокола, имеет три смысловых раздела, однако отличается от требований оригинального стандарта по содержанию и названию большинства компонентов (табл. 2). Как можно видеть, предложенный стандарт перекликается со всеми описанными выше. Так, часть “Обоснование” сближает его с протоколом ODD+P, а “Поведенческие допущения и принятие решений” – с ODD+D. Кроме того, руководство впервые даёт рекомендации не только по содержанию, но и по объёму первых двух разделов: максимум три страницы каждый. Тем не менее одним из основных недостатков Далемского руководства, затрудняющих его использование, является неудачное и малопонятное название многих частей. Например, по заголовку “Уровни случайности” (в оригинале “Levels of Randomness”) сложно догадаться, что в этой части описания модели авторам следует ответить на вопрос: как случайные события и случайные характеристики влияют на модель?

На наш взгляд, наиболее перспективным, удобным и простым в использовании в настоящее время является стандарт ODD+D с дополнениями, предложенными ODD+2D-протоколом. Протокол хорошо структурирован и подходит для любых агент-ориентированных моделей, в которых присутствует человек, способный принимать решения и перемещаться в физическом простран-

стве, например, принимать решения о переезде и переезжать из одного региона в другой.

Несмотря на указанные достоинства ODD+D-протокола, он не позволяет дать полного и качественного описания целого пласта агент-ориентированных моделей – моделей, предназначенных для апробации управленческих решений. Следует понимать, что решения в таких моделях принимают не только агенты, но и пользователи программного продукта, и поэтому для данного класса крайне важным становится описание того, как модель осуществляет поддержку принятия решений, какие эксперименты позволяет проводить. Активно развивающиеся в настоящее время агент-ориентированные системы поддержки принятия решений (Agent-based Decision Support System) [23–25] также невозможно корректно описать, используя любую из существующих модификаций ODD-протокола. Причина в том, что в отличие от обычных агент-ориентированных моделей (АОМ) агентные системы поддержки принятия решений состоят из ядра (модели) и надстроек – программной оболочки с дружественным и интуитивно понятным интерфейсом, предназначенным для апробации различных управляющих воздействий конечным пользователем – лицом, принимающим решения. Указанные проблемы обусловили актуальность и практическую значимость разработки отдельного стандарта описания таких моделей.

ПРОТОКОЛ ОПИСАНИЯ АОМ, ПРЕДНАЗНАЧЕННЫХ ДЛЯ АПРОБАЦИИ УПРАВЛЕНЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ

Для решения поставленной задачи простой адаптации ODD-протокола становится недостаточно. Однако проведённый анализ существующих стандартов позволяет учитывать их недостатки и использовать достоинства. Поэтому при разработке авторского протокола мы придерживались следующих принципов:

- простота и понятность формулировок;
- полнота описания модели;
- наглядность и структурированность;
- возможность табличного представления;
- наличие перечня вспомогательных вопросов и шаблона для заполнения;
- учёт отечественного опыта, принятой терминологии и лучших образцов описания имитационных моделей.

В российских публикациях разделу “Overview” по смыслу соответствует “Краткое описание модели”, разделу “Design concepts” – “Концепция модели”, “Концептуальная модель” или “Концептуальный взгляд на модель”, “Details” – “Конструкция модели” [1, 26, 27].

Таким образом, в русскоязычных описаниях агент-ориентированных моделей уже сложился своеобразный стандарт трёх “К”:

1. Краткий обзор.
2. Концепция.
3. Конструкция.

Образно выражаясь, краткий обзор, концепция и конструкция – это три кита, на которых должно держаться грамотное и последовательное описание агент-ориентированных моделей на русском языке. Именно данная трёхкомпонентная структура положена в основу предлагаемого нами протокола. Табличная форма протокола выбрана сознательно (табл. 3). Она позволяет использовать его как шаблон для заполнения либо как план описания разработанной модели на усмотрение автора. Если автор предпочитает табличную форму протокола, его всегда можно дать приложением к статье, используя основной текст для более подробного описания той части разработок, которая обладает наибольшей новизной или практической значимостью.

Важным отличием предлагаемого протокола от имеющихся зарубежных стандартов является наличие информации об управляемых параметрах модели и вычислительных экспериментах, которые могут быть проведены лицом, принимающим решения, для апробации управленческих воздействий. Следует отметить, что все ODD-протоколы рекомендуют добавлять в статью раздел “Эксперименты” после описания по протоколу и не включают его в сам стандарт, называя стандартизацию описания имитационных экспериментов сложной задачей, заслуживающей отдельного подробного рассмотрения [8]. Однако в приложении S7 к последней версии протокола всё-таки даются советы по документированию калибровки, верификации и анализа моделей. В то же время для прикладных агент-ориентированных моделей описание способов проведения экспериментов пользователем крайне важно, поскольку раскрывает не только возможности модели, но и её предназначение.

На наш взгляд, использование протокола должно стать обязательной частью публикаций по агент-ориентированному моделированию. В первую очередь такого требования выгодно придерживаться редакциям научных журналов, поскольку это значительно упростит процесс рецензирования. Категоричный отказ автора от использования стандартного протокола может рассцениваться как попытка публикации некачественного материала и служить одним из признаков псевдо-АОМ, к которым можно также отнести: размытые формулировки и отсутствие конкретики при описании агентов и их поведения, чисто вербальное описание без формализации, отсутствие информации о программной реа-

Таблица 3. Табличная форма протокола

Структурные элементы	Вспомогательные вопросы
1. Краткий обзор	
Название модели	Есть ли у модели официальное полное название? Если да, то какое? Есть ли краткое название? Под каким названием распространяется программный продукт?
Авторы-разработчики	Кто является разработчиками модели? Кому принадлежат права на модель?
Цель и предназначение	Какова цель моделирования? Каково предназначение модели? Для кого и зачем создана модель?
Структурные блоки	Из каких подмоделей состоит модель? Какие задачи, соответствующие цели и предназначению модели, решает каждый структурный блок?
Типы агентов	Какие типы агентов присутствуют в модели? Каким объектам реальности они соответствуют? Есть ли коллективные типы агентов или уровни иерархии?
Внешняя среда	Что составляет внешнюю для агентов среду? Какие объекты, кроме агентов, присутствуют в модели? Как пространство включено в модель?
Характеристики агентов и среды	Какими качественными и количественными характеристиками обладают агенты и среда в модели? Какие переменные используются для формализации характеристик? Какие значения они могут принимать и какие единицы измерения имеют? Какие характеристики являются условными и определяются экспертным путём или в процессе калибровки?
Источники данных	Какие источники использованы для наполнения модели реальными данными и определения характеристик агентов и их поведения?
Масштаб	В каких единицах измеряется время в модели? Чему равен шаг моделирования? В каком масштабе реализована модель? Имеется ли возможность масштабирования?
2. Концепция модели	
Теоретическая основа	Какие общие концепции, теории или гипотезы лежат в основе модели? Чем обоснован их выбор?
Допущения и ограничения	Какие допущения и ограничения используются в модели?
Динамика внешней среды	Какие изменения могут происходить во внешней среде и в каком порядке?
Поведение агентов	а) Общая характеристика поведения. Какие действия и взаимодействия могут совершать агенты? Какова очерёдность этих действий? В каких состояниях могут находиться агенты и какие переходы совершать? б) Восприятие. Какую информацию о действиях других агентов и состояниях внешней среды собирают или получают агенты? Является ли информация полной? Возможно ли искажение информации? в) Принятие решений. Могут ли агенты принимать индивидуальные или коллективные решения? Какие правила принятия решений используют? Как поведение других агентов и изменения внешней среды влияют на принятие решений агентами? Каким образом учитывается неопределённость? Как учитывается гетерогенность агентов? Разнородны ли агенты в принятии решений? г) Обучение. Способны ли агенты к обучению и адаптации? Как агенты меняют правила принятия решений и модели поведения в зависимости от своего жизненного опыта? д) Прогнозирование. Способны ли агенты к прогнозированию последствий своих действий и выбору оптимальных решений? Какие данные используют для прогнозирования? Могут ли ошибаться в своих прогнозах? е) Формирование коллективов. Способны ли агенты объединяться в группы или коллективы? Как отличается коллективное поведение от индивидуального?
Стохастичность	Какие процессы и события в модели являются случайными или частично случайными? Чем это обосновано?

Таблица 3. Окончание

Структурные элементы	Вспомогательные вопросы
Управляемые параметры и апробация управленческих решений	Какие параметры модели могут меняться экзогенно? Чем это обосновано? Как это соотносится с полномочиями лиц, принимающих решения, для которых предназначена модель? Какие решения позволяет апробировать модель путём изменения экзогенно управляемых параметров?
3. Конструкция модели	
Общие сведения	На каком языке программирования и в какой среде имитационного моделирования реализована модель? Каковы системные требования? Какие версии модели существуют? Доступна ли модель для ознакомления и скачивания?
Ввод данных	Как осуществляется ввод данных в модели? Используются ли данные из внешних источников? Какие данные и откуда модель считывает?
Установка начального состояния	Как формируется начальная популяция и задаются стартовые характеристики агентов и внешней среды? Считываются ли характеристики из базы данных или задаются с использованием функций распределения вероятностей? В каком порядке? Сколько агентов каждого типа создаётся в модели в момент запуска? Можно ли экзогенно менять стартовое число агентов? Какой момент реального времени соответствует старту модели?
Действия на шаге	Какие процессы и в каком порядке запускаются на шаге моделирования? Какие алгоритмы и формулы, соответствующие этим процессам, задают в модели поведение агентов и изменение внешней среды? Как функционируют и взаимодействуют между собой структурные блоки модели (подмодели)?
Вывод данных	Какие данные собираются в модели? Какие из них выводятся на экран, в базу данных или во внешнюю систему визуализации? Какие способы и уровни агрегирования данных применяются?
Поддержка принятия решений	Каким образом осуществляется поддержка принятия решений? Как организовано взаимодействие программы с конечным пользователем? Имеется ли руководство пользователя или инструкция к программе? Какие интерактивные элементы управления доступны пользователю? Каким управляемым параметрам они соответствуют? Какие типы экспериментов позволяет проводить модель? Предлагается ли перечень встроенных сценариев? Предусмотрена ли возможность задать пользовательский сценарий?

Источник: разработано авторами.

лизации модели либо формулировки вида “модель может быть реализована в ...”.

Однако, это не значит, что описание моделей должно стать строго формализованным и лишённым научного творчества: описание по протоколу в табличной форме может использоваться как паспорт модели и предоставляться в редакцию в виде приложения к статье, что позволит не менять авторский стиль изложения и подачу материала и даже структурировать основной текст в формате IMRAD. В качестве образцов корректного текстового описания моделей и их возможностей мы рекомендуем использовать статьи: “Имитация особенностей репродуктивного поведения населения в агент-ориентированной модели региона” [28], “Демографическая агент-ориентированная модель России и оценка её применимости для решения практических управленческих задач” [29], “Агент-ориентированная демографическая модель Дальнего Востока как

инструмент поддержки принятия управленческих решений” [30].

Подчеркнём, что предлагаемый 3К-протокол впервые представлен в данной статье и ранее не использовался нами в полном объёме в научных публикациях, однако он учитывает и обобщает накопленный авторами уникальный многолетний опыт описания агент-ориентированных моделей, предназначенных для апробации управленческих решений, позволяет избежать ошибок и недосказанности в описании моделей, сделать представление сложных результатов более полным, но в то же время понятным и прозрачным.

Основными преимуществами применения протокола для авторов станут упрощение процесса описания модели за счёт использования готового шаблона, без опасения забыть или пропустить что-то важное; для редакций научных журналов — повышение качества публикуемых материалов и ускорение рассмотрения рукопи-

сей; для рецензентов – упрощение процесса рецензирования благодаря хорошо структурированной и более полной информации о моделях; для управленцев – повышение доступности научных разработок и упрощение поиска подрядчиков. Таким образом, применение протокола будет выгодно всем.

Кроме того, стандартизованное описание АОМ может быть использовано при создании открытого реестра моделей, в котором управленцы смогут найти подходящую АОМ и/или разработчиков. В таком реестре на основании заполнения форм, соответствующих структуре протокола, может быть сформирован паспорт модели, а самой модели присвоен индивидуальный идентификационный номер. Поиск и сравнение программных продуктов в реестре может осуществляться по ключевым характеристикам и со временем стать настолько же простым и удобным, как выбор товара в интернет-магазинах электроники.

* * *

Преимущества стандартизованного описания моделей очевидны, однако на протяжении всех 17 лет существования ODD-протокола разработчики задаются вопросом о причинах его недостаточной, на их взгляд, распространённости. Библиометрический анализ с использованием базы данных Scopus, проведённый в работе [9] в 2021 г., показал, что, начиная с 2006 г., когда был предложен протокол, его популярность постоянно растёт и число исследователей, предпочитающих стандартизованное описание своей модели, увеличивается; тем не менее с учётом роста общего количества статей об АОМ в относительном выражении распространённость протокола практически не меняется. Чаще всего протокол используется в статьях “The Journal of Artificial Societies and Social Simulation” (JASSS). На наш взгляд, это объясняется не столько спецификой журнала, сколько представленной в разделе “Для авторов” открытой рекомендацией редакции журнала использовать в рукописях ODD-протокол⁴. Авторы не обязаны следовать данной рекомендации и сами выбирают формат описания, однако применение ODD-протокола постепенно становится признаком хорошего тона, уважения к коллегам и готовности к диалогу. В целом же по другим журналам пока складывается интересная ситуация: протокол используется больше в методологических статьях и статьях о самом протоколе, чем в статьях об агент-ориентированных экономических моделях. А значит, мотивировать исследователей к стандартизованному описанию

моделей могут только коллеги, редакции и рецензенты.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Бахтизин А.Р.* Агент-ориентированные модели экономики. М.: ЗАО «Издательство “Экономика”», 2008.
2. *Новикова Т.С., Цыплаков А.А.* Разработка социальной политики на основе сочетания агент-ориентированного и межотраслевого подходов // Журнал Новой экономической ассоциации. 2021. № 4 (52). С. 12–36. <https://doi.org/10.31737/2221-2264-2021-52-4-1>
3. *Мигранова Л.И., Минязев А.И.* Прогнозирование кадровой обеспеченности региона на основе агент-ориентированного подхода // Фундаментальные исследования. 2022. № 12. С. 130–136. <https://doi.org/10.17513/fr.43409>
4. *Коровин Г.Б.* Агент-ориентированная модель цифровизации промышленности региона // Вестник Забайкальского государственного университета. 2022. Т. 28. № 7. С. 104–114. <https://doi.org/10.21209/2227-9245-2022-28-7-104-114>
5. *Машкова А.Л.* Анализ влияния информационных воздействий на выбор рациона питания жителями России на базе агент-ориентированной модели // Искусственные общества. 2022. Т. 17. № 4. <https://doi.org/10.18254/S207751800023531-3>
6. *Дианов С.В., Калашников К.Н., Ригин В.А.* Агент-ориентированное моделирование регионального здравоохранения: решение задачи формализации медицинской активности жителей // Экономические и социальные перемены: факты, тенденции, прогноз. 2022. Т. 15. № 1. С. 55–73. <https://doi.org/10.15838/esc.2022.1.79.3>
7. *Grimm V., Berger U., Bastiansen F. et al.* A standard protocol for describing individual-based and agent-based models // Ecological Modelling. 2006. V. 198. № 1–2. P. 115–126. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2006.04.023>
8. *Grimm V., Railsback S.F., Vincenot C.E. et al.* The ODD protocol for describing agent-based and other simulation models: A second update to improve clarity, replication, and structural realism // Journal of Artificial Societies and Social Simulation. 2020. № 23 (2) 7. <http://jasss.soc.surrey.ac.uk/23/2/7.html>. <https://doi.org/10.18564/jasss.4259>
9. *Alvarez E., Brida J.G., London S.* ABM documentation and ODD Protocol in Economics: a bibliometric analysis // Advances in Complex Systems. 2021. V. 24. № 03n04. P. 2140003. <https://doi.org/10.1142/S0219525921400038>
10. *Hamill L., Gilbert N.* Agent-Based Modelling in Economics. Chichester: WILEY, 2016. <https://doi.org/10.1002/9781118945520>
11. *Россошанская Е.А.* Комплексная агент-ориентированная модель воспроизводства трудового потенциала муниципального образования // Экономические и социальные перемены: факты, тенденции, прогноз. 2019. Т. 12. № 1. С. 124–137. <https://doi.org/10.15838/esc.2019.1.61.7>

⁴ <https://www.jasss.org/admin/submit.html>

12. *Grimm V., Railsback S.F.* Individual-Based Modeling and Ecology // Princeton series in theoretical and computational biology. Princeton University Press, 2005.
13. *Grimm V., Berger U., DeAngelis D.L. et al.* The ODD protocol: a review and first update // Ecological modelling. 2010. V. 221. № 23. P. 2760–2768. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2010.08.019>
14. *Polhill J.G., Parker D., Brown D., Grimm V.* Using the ODD protocol for describing three agent-based social simulation models of land-use change // Journal of Artificial Societies and Social Simulation. 2008. № 11 (2) 3. <https://www.jasss.org/11/2/3.html>
15. *Polhill G.* ODD Updated // Journal of Artificial Societies and Social Simulation. 2010. № 13 (4) 9. <https://www.jasss.org/13/4/9.html>. <https://doi.org/10.18564/jasss.1700>
16. *Grimm V., Revilla E., Berger U. et al.* Pattern-oriented modeling of agent-based complex systems: Lessons from ecology // Science. 2005. V. 310. № 5750. P. 987–991. <https://doi.org/10.1126/science.1116681>
17. *Müller B., Angermüller F., Drees R. et al.* Describing human decisions in agent-based social-ecological models – ODD+D an extension of the ODD protocol // Working Paper, April 23rd 2012. <http://ssrn.com/abstract=2044736>.
18. *Laatabi A., Marilleau N., Nguyen-Huu T. et al.* ODD+2D: An ODD based protocol for mapping data to empirical ABMs // Journal of Artificial Societies and Social Simulation. 2018. № 21 (2) 9. <https://www.jasss.org/21/2/9.html>. <https://doi.org/10.18564/jasss.3646>
19. *Reinhardt O., Rucheinski A., Uhrmacher A.M.* ODD+P: complementing the ODD protocol with provenance information // Winter Simulation Conference (WSC). Gothenburg, Sweden, 2018. P. 727–738. <https://doi.org/10.1109/WSC.2018.8632481>
20. *Wolf S., Bouchaud J., Cecconi F. et al.* Describing economic agent-based models – Dahlem ABM documentation guidelines // Complexity Economics. 2013. № 2. P. 63–74. <https://doi.org/10.7564/13-COEC12>
21. *Groeneveld J., Müller B., Angermüller F. et al.* Good modelling practice: expanding the ODD model description protocol for socioenvironmental agent based models // 6th International Congress on Environmental Modelling and Software. Leipzig, Germany. July 2012. <https://scholarsarchive.byu.edu/iemssconference/2012/Stream-B/2>.
22. *Müller B., Bohn F., Dreßler G. et al.* Describing human decisions in agent-based models – ODD+D, an extension of the ODD protocol // Environmental Modelling & Software. 2013. № 48. P. 37–48. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2013.06.003>
23. *Chesney T., Gold S., Trautrimis A.* Agent Based Modelling as a Decision Support System for Shadow Accounting // Decision Support Systems. 2017. V. 95. P. 110–116. <https://doi.org/10.1016/j.dss.2017.01.004>
24. *Matsatsinis N.F., Delias P.* Implementing an Agent-based Decision Support System for Task Allocation: A Multi-Criteria Approach // Proceedings of the 9th Panhellenic Conference in Informatics – PCI 2003 (Thessaloniki, November 21–23, 2003). Berlin: Springer, 2003. P. 128–141.
25. *Quindt J., Reetz E., Kukuck V. et al.* Agent Based Decision Support System for Optimizing Logistical Processes in Agricultural Production // 9th IEEE International Conference on Industrial Informatics. Lisbon: IEEE, 2011. P. 27–32. <https://doi.org/10.1109/INDIN.2011.6034831>
26. *Макаров В.Л., Бахтизин А.Р., Сушко Е.Д. и др.* Суперкомпьютерные технологии в общественных науках: агент-ориентированные демографические модели // Вестник Российской академии наук. 2016. № 5. С. 412–421. <https://doi.org/10.7868/S086958731605008X>
27. *Сушко Е.Д.* Мультиагентная модель региона: концепция, конструкция и реализация / Препринт # WP/2012/292. М.: ЦЭМИ РАН, 2012.
28. *Макаров В.Л., Бахтизин А.Р., Сушко Е.Д.* Имитация особенностей репродуктивного поведения населения в агент-ориентированной модели региона // Экономика региона. 2015. № 3(43). С. 312–322. <https://doi.org/10.17059/2015-3-25>
29. *Бахтизин А.Р., Макаров В.Л., Максаков А.А., Сушко Е.Д.* Демографическая агент-ориентированная модель России и оценка её применимости для решения практических управленческих задач // Искусственные общества. 2021. Т. 16. № 2. <https://artsoc.jes.su/s207751800015357-1-1/> <https://doi.org/10.18254/S207751800015357-1>
30. *Россошанская Е.А., Дорошенко Т.А., Самсонова Н.А. и др.* Агент-ориентированная демографическая модель Дальнего Востока как инструмент поддержки принятия управленческих решений // Государственное управление. Электронный вестник. 2022. № 94. С. 203–224. <https://doi.org/10.24412/2070-1381-2022-94-203-224>