

Вестник Череповецкого государственного университета. 2023. № 1 (112). С. 79–99.
Cherepovets State University Bulletin, 2023, no. 1 (112), pp. 79–99.

Научная статья

УДК 004.896

<https://doi.org/10.23859/1994-0637-2023-1-112-6>

**Сервис-ориентированный подход к проектированию агент-ориентированных
моделей оптимального пространственного размещения объектов
инфраструктуры здравоохранения**

**Швецов Анатолий Николаевич^{1✉}, Дианов Сергей Владимирович²,
Дианов Даниил Сергеевич³, Сидоренко Екатерина Эдуардовна⁴,
Зорин Дмитрий Алексеевич⁵**

^{1,2,4,5} Вологодский государственный университет
Вологда, Российская Федерация

¹smithv@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7021-5184>

²dianov.sv@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8297-8077>

⁴katerin02ka08@gmail.com

⁵dima.zorin.2015@mail.ru

³Вологодский научный центр РАН

Вологда, Российская Федерация

³daniil.dianov@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-4766-8801>

Аннотация. В статье представлена авторская концепция построения агент-ориентированных моделей, обеспечивающих процесс принятия решений по оптимальному пространственному размещению объектов инфраструктуры здравоохранения. Она включает описание задачи по оптимальному пространственному размещению объектов инфраструктуры здравоохранения, а также описание моделей с использованием протокола, предназначенного для стандартизации описаний агент-ориентированных моделей.

Ключевые слова: система поддержки принятия решений, система здравоохранения, пространственное размещение, агент-ориентированное моделирование

Для цитирования: Швецов А. Н., Дианов С. В., Дианов Д. С., Сидоренко К. Э., Зорин Д. А. Сервис-ориентированный подход к проектированию агент-ориентированных моделей оптимального пространственного размещения объектов инфраструктуры здравоохранения // Вестник Череповецкого государственного университета. 2023. № 1 (112). С. 79–99. <https://doi.org/10.23859/1994-0637-2023-1-112-6>.

Service-oriented approach to designing agent-based models of optimal spatial placement of healthcare infrastructure facilities

Anatoly N. Shvetsov^{1✉}, Sergey V. Dianov²,
Daniil S. Dianov³, Ekaterina E. Sidorenko⁴, Dmitry A. Zorin⁵
^{1,2,4,5} Vologda State University,

Vologda, Russia,

^{1✉}smithv@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7021-5184>

²dianov.sv@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8297-8077>

⁴katerin02ka08@gmail.com

⁵dima.zorin.2015@mail.ru

³ Vologda Scientific Center of the Russian Academy of Sciences
Vologda, Russia,

³daniil.dianov@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-4766-8801>

Abstract. The article presents the authors' concept of building agent-based models that provide the decision-making process for the optimal spatial placement of healthcare infrastructure facilities. It includes optimal spatial location of healthcare infrastructure facilities, as well as the description of models using a protocol designed to standardize descriptions of agent-based models.

Keywords: decision support system, health care system, spatial distribution, agent-based modeling

For citation: Shvetsov A. N., Dianov S. V., Dianov D. S., Sidorenko E. E., Zorin D. A. Service-oriented approach to designing agent-based models of optimal spatial placement of healthcare infrastructure facilities. *Cherepovets State University Bulletin*, 2023, no. 1 (112), pp. 79–99. (In Russ.). <https://doi.org/10.23859/1994-0637-2023-1-112-6>.

Введение

Формирование сети медицинских организаций происходит и базируется на основе структуры и уровня заболеваемости, смертности населения, его половозрастного состава, климатических, географических особенностей территорий и транспортной доступности медицинских организаций. В настоящее время для решения задач поиска оптимального месторасположения объектов инфраструктуры здравоохранения все шире используется имитационное моделирование. По сравнению с другими подходами оно позволяет осуществлять подробное описание системы и анализировать динамические эффекты. Эти особенности делают имитационное моделирование мощным инструментом для решения задач пространственного размещения объектов. Одним из наиболее динамично развивающихся методов имитационного моделирования является агент-ориентированное моделирование. Агент-ориентированные модели (АОМ) за счет возможности описания индивидуального поведения элементов системы позволяют решать более широкий круг вопросов, чем традиционные подходы, более тонко учитывать отдельные аспекты функционирования сложной системы¹. При решении задач пространственного размещения объектов инфраструктуры здравоохранения агент-ориентированное моделирование обеспечит возможность учиты-

¹ Nianogo R.A., Arah O.A. Agent-based modeling of noncommunicable diseases: a systematic review // *Am. J. Public Health*. 2015. Vol. 105(3). Pp. 20–31.

вать конкретные потребности населения и поведенческие установки различных социальных групп. Весомым преимуществом такого подхода является возможность учета динамики изменения характеристик исследуемых сущностей во времени и динамики пространственного размещения исследуемых сущностей, а также возможность учета структуры взаимосвязей между исследуемыми сущностями¹. В агент-ориентированных моделях возможно встраивание оптимизационных механизмов в логику работы модели, где медицинские сервисы могут выступать в качестве агентов, а значит иметь собственную модель поведения, в том числе в части территориального размещения: искать места наиболее выгодных для себя возможностей предоставления услуг, конкурируя и кооперируясь при этом.

Построение максимально приближенной к реальности модели, которая отражала бы комплекс базовых и принципиальных транзакций между агентами в рамках региональной системы здравоохранения, позволит формировать адекватные управленческие решения, касающиеся распределения ресурсов, рационального пространственного размещения объектов инфраструктуры отрасли.

Несмотря на понимание возможностей при использовании АОМ, в здравоохранении также имеется ряд важных ограничений и проблем, вытекающих из характера их разработки и параметризации. Одна из главных – противоречие между простотой модели и ее реализмом. Нахождение баланса между стремлением к упрощенному представлению реальности и необходимостью включать достаточно сложные элементы, чтобы обеспечить новое понимание, становится истинным искусством², которое развивается путем проб и ошибок. Поэтому, осознавая специфику АОМ, большинство авторов уделяют особое внимание разработке ее концептуальной структуры³. Отмечается, что для реализации АОМ разработчикам необходимо преодолеть сложности, связанные с определением типов агентов, их количества и характеристик, с пониманием механизма взаимодействия агентов друг с другом и с внешней средой⁴.

Основной целью представленного исследования является разработка концепции агент-ориентированных моделей, обеспечивающих процесс принятия решений по оптимальному пространственному размещению объектов инфраструктуры здравоохранения.

¹ El-Sayed A.M., Scarborough P., Seemann L., Galea S. Social network analysis and agent-based modeling in social epidemiology // Epidemiol. Perspect. Innov. 2012. № 9(1). Pp. 1.

² Hupert N., Xiong W., Mushlin A. The virtue of virtuality: the promise of agent-based epidemic modeling // Transl. Res. J. Lab. Clin. Med. 2008. № 151(6). Pp. 273–274.

³ Чекмарева Е. А. Концептуальная модель воспроизводства трудового потенциала на муниципальном уровне: агент-ориентированный подход // Социальное пространство. 2017. № 4 (11). URL: <http://sa.isert-ran.ru/article/2376> (дата обращения: 28. 10. 2022).

⁴ Маковеев В. Н. Применение агент-ориентированных моделей в анализе и прогнозировании социально-экономического развития территорий // Экономические и социальные перемены: факты, тенденции, прогноз. 2016. № 5 (47). С. 272–289.

Основная часть

Обзор существующих агент-ориентированных моделей предоставления медицинских услуг. Агент-ориентированное моделирование становится все более популярным методом визуализации, анализа и оценки сложных динамических систем в здравоохранении¹. Эти модели могут использоваться для проведения виртуальных экспериментов по управлению региональными системами здравоохранения. Ввиду сложности таких систем, как правило, создаются модели отдельных аспектов их функционирования. Традиционно они используются для прогнозирования развития эпидемических кризисов². Можно встретить АОМ оказания неотложной помощи³, распределения населения территории по медицинским организациям⁴, анализа потоков пациентов в медицинских учреждениях⁵, использования коечного фонда в стационарах⁶, сетей предоставления медицинских услуг для групп населения с конкретным заболеванием⁷.

В качестве прототипов основных агентов в моделях выступают пациенты. Им приписываются значимые с точки зрения предметной области характеристики и по-

¹ Cassidy R., Singh N. S., Schiratti P. R. et al. Mathematical modelling for health systems research: a systematic review of system dynamics and agent-based models // BMC Health Services Research. 2019. Vol. 19. № 845. <https://doi.org/10.1186/s12913-019-4627-7>

² Lee B. Y., Brown S. T., Korch G. W., Cooley P. C., Zimmerman R. K., Wheaton W. D., Zimmer S. M., Grefenstette J. J., Bailey R. R., Assi T.-M. and Burke D. S. A computer simulation of vaccine prioritization, allocation, and rationing during the 2009 H1N1 influenza pandemic // Vaccine. 2010. Vol. 28. № 31. Pp. 4875–4879.

³ Brenner S., Zeng Z., Liu Y., Wang J., Li J. and Howard P. K. Modeling and analysis of the emergency department at university of Kentucky Chandler Hospital using simulations // J. Emerg. Nurs. 2010. Vol. 36. № 4. Pp. 303–310; Rohleder T. R., Lewkonja P., Bischak D. P., Duffy P. and Hendi jani R. Using simulation modeling to improve patient flow at an outpatient orthopedic clinic // Health Care Manag. Sci. 2011. Vol. 14(2). Pp. 135–145; Liu Z., Cabrera E., Rexachs D., Luque E. A generalized agent-based model to simulate emergency departments // The sixth International Conference on Advances in System Simulation. 2014. Available at: https://www.researchgate.net/publication/282571815_A_Generalized_Agent-Based_Model_to_Simulate_Emergency_Departments (accessed: 28.10.2022).

⁴ Jones S. S. and Evans R. S. An agent based simulation tool for scheduling emergency department physicians // AMIA Annu. Symp. Proc. 2008. Pp. 338–342; Bonabeau E. Agent-based modeling: methods and techniques for simulating human systems // PNAS. 2002. Vol. 99(3). Pp. 7280–7287.

⁵ Hutzschenreuter A. K., Bosman P. A. N., Blonk-Altena I., van Aarle J. and La Poutré H. A gent-based patient admission scheduling in hospitals // Belgian/Netherlands Artificial Intelligence Conference. 2008. Pp. 315–316.

⁶ Vasilakis C. and El-Darzi E. A Simulation Study of the Winter Bed Crisis // Health Care Management Science. 2001. Vol. 4. Pp. 31–36. <https://doi.org/10.1023/A:1009649615548>

⁷ Charfeddine M., Montreuil B. Integrated agent-oriented modeling and simulation of population and healthcare delivery network: application to COPD chronic disease in a Canadian region // Simulation Conference (WSC). 2010. Pp. 2327–2339. doi: 10.1109/WSC.2010.5678930.

ведение. Так, Paulussen T. O. и др. в работе от 2006 года¹ рассматривали АОМ в области медицинских исследований и управления службами здравоохранения. Был сделан общий вывод о том, что характеристики агентов соотносились со значимыми с точки зрения рассматриваемой проблемы социально-демографическими характеристиками пациентов. В статье Tracy M., Cerdá M. и Keyes K. M.² представлена схема гипотетической агент-ориентированной модели здравоохранения, где индивиды могут иметь различные характеристики индивидуального уровня – от эндогенных факторов до социально-экономического статуса, а также характеристики на уровне сообщества, которые пересекаются вместе, чтобы формировать индивидуальное поведение в отношении здоровья и использования медицинских услуг. Создание концептуальной основы для АОМ объединяет различные заинтересованные стороны и дает четкие предположения относительно аспектов конкретной системы и того, как они работают вместе для достижения результатов в отношении здоровья населения.

В работе Alibrahim A. и Wu S.³ рассматривается агент-ориентированная модель выбора пациентов поставщиками медицинских услуг в подотчетных организациях здравоохранения. Структура показывает различные уровни системы моделирования и различных агентов – плательщика, поставщика и пациента – и их ключевые компоненты. Это исследование позволяет оценивать процесс выбора пациентом обслуживающей организации.

В статье Einzinger P. и др.⁴ представлена агентская модель GAP-DRG, которая позволяет сравнивать схемы возмещения расходов при амбулаторном лечении. Она моделирует пациентов и медицинских работников в качестве агентов. При симуляции у пациентов возникают проблемы со здоровьем (заболевания) и потребность в медицинских услугах. Это приводит к использованию медицинских провайдеров. Поведение агентов в модели разделено на пять модулей: эпидемиология, потребность в обслуживании, использование провайдера, предоставление услуг, возмещение. Структура модели позволяет каждому пациенту иметь несколько медицинских проблем одновременно. Каждая медицинская проблема создает потребность в услугах на каждую четверть года в виде списка медицинских услуг и соответствующих частот. Затем пациенты пытаются получить эти услуги в необходимых количествах от поставщиков медицинских услуг (использование поставщика). Они будут выпол-

¹ Paulussen T. O. et al. Agent-Based Patient Scheduling in Hospitals // Multiagent Engineering. International Handbooks on Information Systems. Springer, Berlin, Heidelberg. 2006. Pp. 255–275. https://doi.org/10.1007/3-540-32062-8_14

² Tracy M., Cerdá M. and Keyes K. M. Agent-Based Modeling in Public Health: Current Applications and Future Directions // Annual Review of Public Health. 2018. Vol. 39. Pp. 77–94. doi: 10.1146/annurev-publhealth-040617-014317

³ Alibrahim A., Wu S. An agent-based simulation model of patient choice of health care providers in accountable care organizations // Health Care Manag Sci. 2018. Vol. 21(1). Pp. 131–43. <https://doi.org/10.1007/s10729-016-9383-1>

⁴ Einzinger P., Popper N., Breitenacker F., Pfeffer N., Jung R., Endel G. The GAP-DRG Model: Simulation of Outpatient Care for Comparison of Different Reimbursement Schemes // 2013 Winter Simulations Conference. 2013. Pp. 2299–2308 doi: 10.1109/WSC.2013.6721605

нять услуги, которые они имеют в своих портфелях (предоставление услуг), и отправлять требования о возмещении в социальное страхование. Возмещение происходит один раз в квартал года, когда система возмещения накладывает эти требования и обновляет свою статистику.

В работе от 2004 года Paulussen T. O. и др.¹ описывается агент-ориентированный подход к планированию размещения пациентов в больницах. В АОМ пациенты и больницы реализуются как автономные агенты. Агенты-больницы рассматривают агентов-пациентов как объекты, подлежащие лечению. Агенты-пациенты обращаются к агентам-больницам за предоставлением услуг. Распределение пациентов по больницам осуществляется через рыночный механизм. Агенты-пациенты конкурируют друг с другом за получение услуг в больницах. На формировании их поведения влияют состояние здоровья и цены на услуги. В рамках концепции моделирования учитываются временные характеристики оказания услуг и перемещений к местам их оказания.

Имеется значительный опыт агент-ориентированного моделирования работы отделений неотложной медицинской помощи. С использованием модели, представленной в исследовании Yousefi M. и Ferreira R.², изучаются возможности по перераспределению имеющихся в отделении ресурсов. Помимо пациентов здесь в качестве агентов выступают работники регистратуры, медсестры и врачи. Все они участвуют в процессе принятия решений по перераспределению ресурсов в отделении на основе собственных наблюдений. Это позволяет перераспределять все доступные человеческие ресурсы в течение рабочего дня.

Моделирование поведения пациентов, которые покидают отделение неотложной помощи государственной больницы, не получив услуги, представлено в работе M. Yousefi и др.³. Уход происходит из-за длительного времени ожидания или очередей. При этом агенты-пациенты принимают решение о продолжении ожидания или уходе, в том числе на основании общения друг с другом.

АОМ, рассмотренная в работе B. G. Silverman и др.⁴, нацелена на обеспечение поддержки принятия решений по поиску мер, которые обеспечат улучшение здоровья населения и качество оказания медицинской помощи с одновременным сниже-

¹ Paulussen T. O., Zöller A., Heinzl A., Braubach L., Pokahr A. and Lamersdorf W. Patient scheduling under uncertainty // Proceedings of the 2004 ACM symposium on Applied computing. 2004. Pp. 309–310. <https://doi.org/10.1145/967900.967966>

² Yousefi M., Ferreira R. An agent-based simulation combined with group decision-making technique for improving the performance of an emergency department // Braz J Med Biol Res. 2017. Vol. 50(5). <https://doi.org/10.1590/1414-431X20175955>

³ Yousefi M., Yousefi M., Fogliatto F. S., Ferreira R. P. M., Kim J. H. Simulating the behavior of patients who leave a public hospital emergency department without being seen by a physician: a cellular automaton and agent-based framework // Brazilian Braz J Med Biol Res. 2018. Vol. 51(3). <https://doi.org/10.1590/1414-431X20176961>

⁴ Silverman B. G., Hanrahan N., Bharathy G., Gordon K., Johnson D. A systems approach to healthcare: Agent-based modeling, community mental health, and population well-being // Artificial Intelligence in Medicine. 2015. Vol. 63(2). Pp. 61–71. <https://doi.org/10.1016/j.artmed.2014.08.006>

нием затрат. Агенты-граждане существуют в рамках социальных конструкций более высокого уровня (организации и общество), которые влияют на них и на которые они также могут влиять. В этих условиях определяются их социальные детерминанты здоровья.

Представленный обзор показывает, что отдельные элементы, необходимые для решения задач распределения медицинских ресурсов, присутствуют в агент-ориентированных моделях. Среди них: выделение класса агентов пациентов с набором социально-демографических характеристик; определение в поведении агентов пациентов социальных, пространственных и экономических факторов; выделение классов агентов инфраструктуры здравоохранения (медицинские учреждения, персонал и др.), в модели поведения которых закладываются механизмы согласованных действий; формирование пространственной среды существования агентов; формирование процессов взаимодействия агентов в рамках предоставления медицинских услуг; определение критериев оценки эффективности предоставления медицинских услуг. При этом на текущий момент не существует целостных универсальных концепций формирования агент-ориентированных моделей, обеспечивающих процесс принятия решений по оптимальному пространственному размещению объектов инфраструктуры здравоохранения. Создание варианта такой концепции мы определяем в качестве направления своих исследований.

Формальное описание задачи пространственного размещения объектов инфраструктуры здравоохранения. Задачу пространственного размещения объектов инфраструктуры здравоохранения можно описать как распределение частично мобильных сервисов для мобильных пользователей¹. Мобильность сервисов связана с тем, что они перемещаются к пользователям с целью предоставления услуги. А мобильность пользователей связана с их способностью выбирать сервисы и перемещаться к местам их возможного получения.

В общем виде модель представляется следующим образом: $M = \langle U, R, S, C \rangle$, где U – узлы расположения сервисов и клиентов, R – связи между узлами, S – сервисы, C – пользователи. Сервисы и пользователи могут располагаться в ограниченном количестве мест (рис. 1). Исходя из этого, в модели M может существовать определенное количество узлов расположения сервисов и пользователей: $U = \{U_1, \dots, U_{UN}\}$. Узлы и связи имеют набор характеризующих их атрибутов различной природы: $U : A^U = \{A_1^U, \dots, A_{AUN}^U\}$, $R : A^R = \{A_1^R, \dots, A_{AUN}^R\}$.

¹ Дианов С. В., Калашников К. Н. Использование агент-ориентированных моделей для поддержки принятия решений по пространственному размещению объектов здравоохранения // Социальные и экономические системы. 2021. № 6(24). С. 164–192.

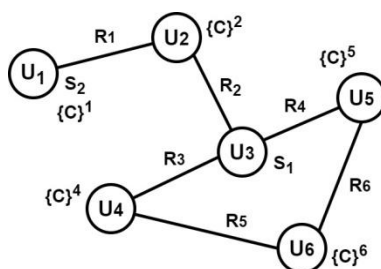


Рис. 1. Пример пространства размещения элементов модели

Между узлами может существовать множество связей – путей перемещения сервисов и клиентов: $R = \{R_1, ..., R_{RN}\}$. В узлах модели размещаются сервисы и клиенты: $S = \{S_1, ..., S_{SN}\}$, $C = \{C_1, ..., C_{CN}\}$. Применительно к описываемой задаче они, обладая активным поведением, относятся к разряду агентов. Агенты-клиенты получают услуги, оказываемые агентами-сервисами. Услуги могут оказываться во время нахождения агента-клиента и сервиса в одном узле. Важной характеристикой агентов при взаимодействии является способность к перемещению между узлами по соединяющим их путям (мобильность). В зависимости от этого возникает некоторый набор возможных вариантов точек оказания услуги и путей перемещения к ним агентов (рис. 2).

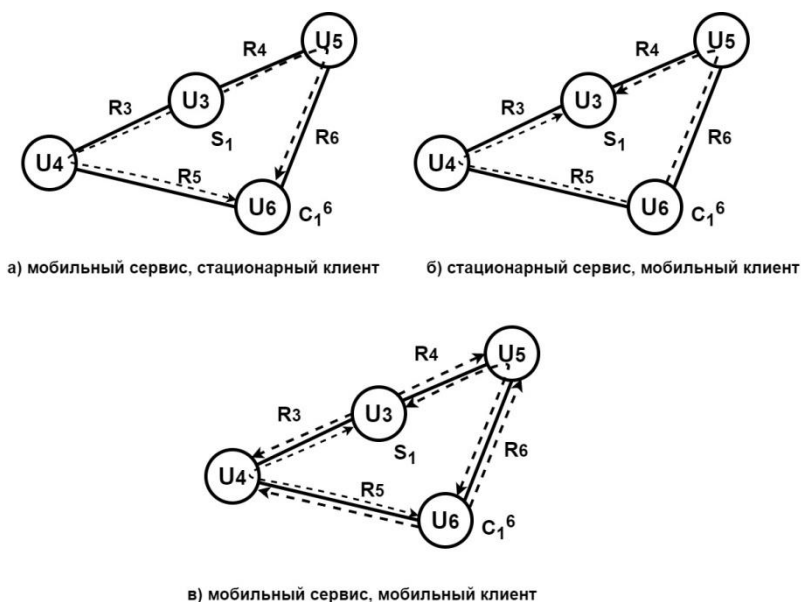


Рис. 2. Варианты путей взаимодействия агентов

Агент *Сервис* может быть описан следующим образом: $S = \langle U_i, A^S, Bh^S \rangle$, где U_i – узел постоянной дислокации сервиса, A^S – множество атрибутов сервиса ($A^S = \{A_1^S, \dots, A_{ASN}^S\}$), Bh^S – модель поведения сервиса. Аналогичное описание имеет агент *Пользователь*: $C = \langle U_i, A^C, Bh^C \rangle$, где U_i – узел постоянной дислокации сервиса, A^C – множество атрибутов сервиса ($A^C = \{A_1^C, \dots, A_{ACN}^C\}$), Bh^C – модель поведения сервиса. Модели поведения агентов содержат модули, в которых определяются сценарии их функционирования (рис. 3). Модули состоят из набора правил, позволяющих агенту выбрать тот или иной сценарий в зависимости от текущих значений параметров элементов модели.

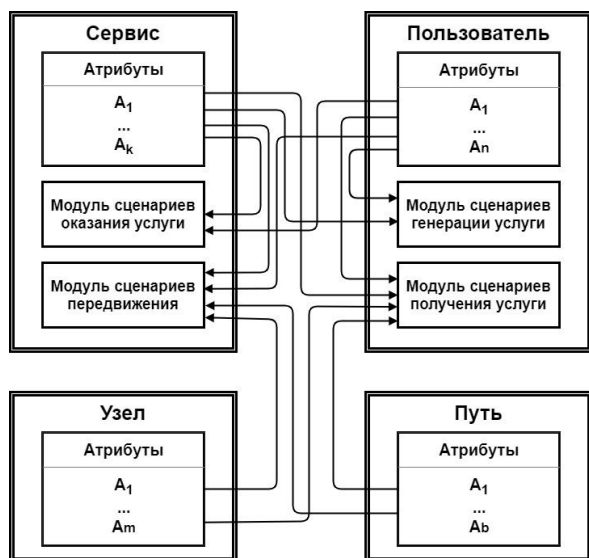


Рис. 3. Схема формирования модулей моделей поведения агентов

В модели поведения агента *Сервис* определены два модуля: $Bh^S = \{Md_s^S, Md_d^S\}$, где Md_s^S – модуль сценариев оказания услуги, Md_d^S – модуль сценариев передвижения. Агенты могут быть двух видов: стационарные, жестко привязанные к конкретному узлу, и перемещаемые. Для стационарных агентов модуль сценариев передвижения не определяется: $Md_d^S = \emptyset$. На уровне модуля сценариев оказания услуги определяется возможность и порядок оказания услуги конкретному пользователю. Исходя из этого, в правилах используются значения атрибутов пользователя и сервиса: $Md_s^S = \{Pr_1^{MdSs}(A^S, A^C), \dots, Pr_{PrMdSsN}^{MdSs}(A^S, A^C)\}$, где $Pr_i^{Md\dots}(X_1, \dots, X_{XN})$ – i -е пра-

вило модуля, содержащее параметры $X_1, ..., X_{XN}$. На уровне модуля сценариев передвижения определяется необходимость, возможность, параметры и маршрут перемещения агента: $Md_d^S = \{Pr_1^{MdSd}(A^S, A^C, A^U, A^R), ..., Pr_{PrMdSdN}^{MdSd}(A^S, A^C, A^U, A^R)\}$.

В модели поведения агента *Пользователь* определены также два модуля: $Bh^S = \{Md_{gu}^C, Md_{pu}^C\}$, где Md_{gu}^C – модуль сценариев генерации услуги, Md_{pu}^C – модуль сценариев получения услуги. Модуль сценариев генерации услуги обеспечивает способность агента *Пользователь* инициировать появление у него необходимости и желания получить конкретную услугу. Это зависит от личных характеристик агента и факторов среды его существования:

$Md_{gu}^C = \{Pr_1^{MdCgu}(A^C, A^U), ..., Pr_{PrMdCguN}^{MdCgu}(A^C, A^U)\}$. С использованием правил модуля сценариев получения услуги агент *Пользователь* определяется с возможностью и способом получения сервиса, а также со своими действиями: $Md_{pu}^C = \{Pr_1^{MdCpu}(A^S, A^C, A^U, A^R), ..., Pr_{PrMdCpuN}^{MdCpu}(A^S, A^C, A^U, A^R)\}$.

Общий алгоритм функционирования агентов модели представлен на рис. 4.

В модели должен быть определен критерий оптимальности. Он связан с оценкой динамики изменений свойств агентов *Сервисов* и *Пользователей*:

$K = f(d(A^S), d(A^C))$, где $f()$ – функция определения критерия оптимальности, $d(X)$ – функция, характеризующая динамику изменения параметра X . Решение задачи связано с многократным моделированием ситуаций с различными комбинациями расположения агентов *Сервисов* в узлах. По результатам каждой итерации рассчитывается значение критерия оптимальности. Полученные значения критериев сравниваются. По результатам сравнения выбирается модель с наилучшим (в определенном смысле) значением критерия.

Общее описание агент-ориентированной модели оптимального пространственного размещения объектов инфраструктуры здравоохранения. Сформулированная сервис-ориентированная концепция агент-ориентированной модели представляется в виде шаблона описания моделей в формате протокола ODD (Overview, Design concepts and Details), предназначенного для стандартизации описаний агент-ориентированных моделей¹.

1. Цель. Модель предназначена для поиска оптимальных параметров инфраструктуры здравоохранения на территории пространственного размещения, количества и параметров производительности элементов. Критериями оптимальности выступают максимальное возможное удовлетворение потребностей населения территории в ме-

¹ Grimm V., Railsback S. F., Vincenot C. E., Berger U., Gallagher C., DeAngelis D. L., Edmonds B., Ge J., Giske J., Groeneveld J., Johnston A. S. A., Milles A., Nabe-Nielsen J., Polhill J.G., Radchuk V., Rohwäder M.-S., Stillman R. A., Thiele J. C. and Ayllón D. 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. Vol. 23(2). №7. doi: 10.18564/jasss.4259

дицинских услугах с временными характеристиками, позволяющими обеспечить их качество, при ограничении имеющимися ресурсами.

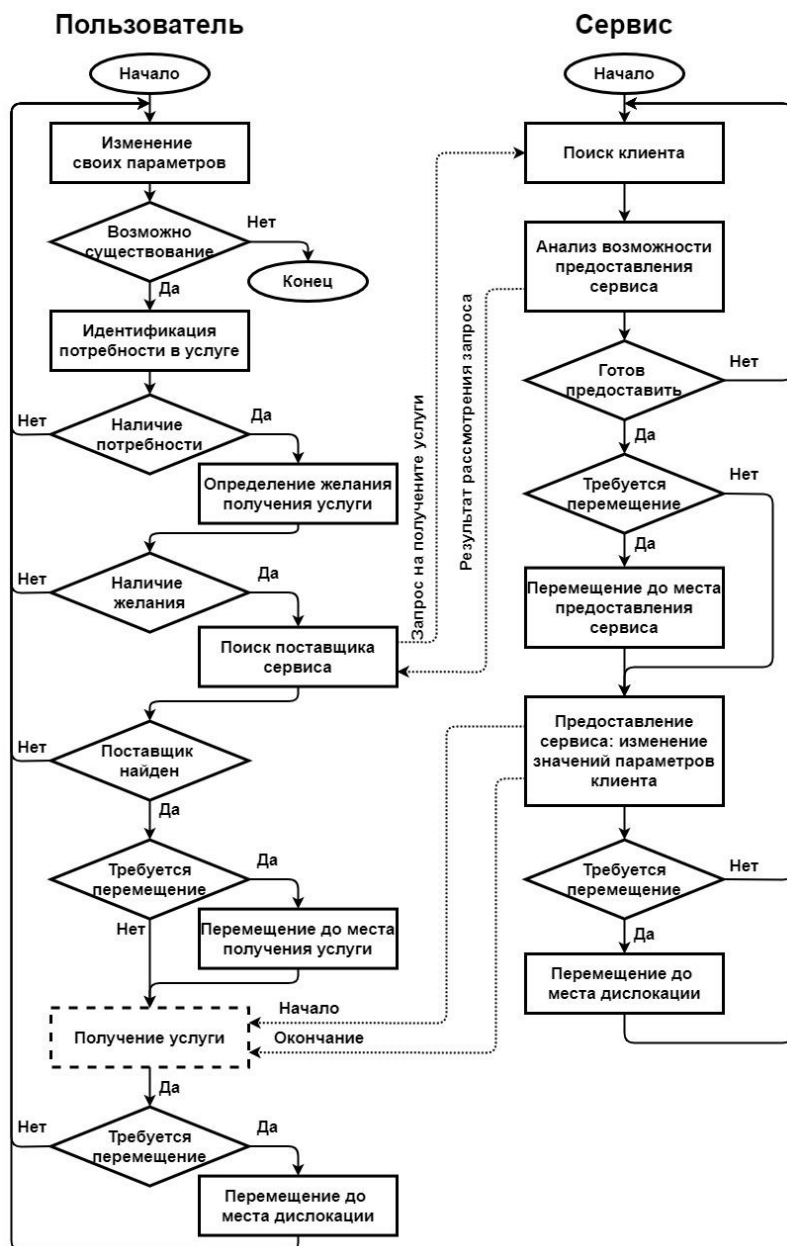


Рис. 4. Общий алгоритм функционирования агентов модели

2. Сущности, переменные состояния и шкалы. Сущности модели: Клиент, Сервис, Узел, Маршрут. Для каждой сущности определены тип и их связь с элементами реальной системы. Пример для сущности Клиент: тип – агент; отображение – человек, нуждающийся в медицинской услуге. Также для каждой сущности определены параметры. По каждому параметру установлены шкала измерений и диапазон варьирования значений. Пример для сущности Клиент: параметр – идентификатор, шкала – наименование, диапазон – произвольный идентификатор (буквенный, числовой, буквенно-числовой).

3. Обзор процессов и планирование. Модельное время задается в минутах. В зависимости от типа рассматриваемых в модели медицинских услуг период моделирования может быть различен. Его необходимо определять исходя из частоты возникновения потребностей в медицинских услугах и продолжительности их предоставления. Перечень процессов: Генерация агента Клиент, Изменение состояния агента Клиент, Получение доступа к услуге, Оказание услуги. Для каждого процесса определены следующие параметры: кем выполняется, период исполнения, порядок исполнения. Пример параметров процесса Генерация агента Клиент: кем выполняется – выполняется на уровне модели; период исполнения – одновременно через определенный период модельного времени; порядок исполнения – на основе анализа значений параметров каждой сущности «Узел» генерируются агенты Клиент с определенными значениями параметров (рис. 5).

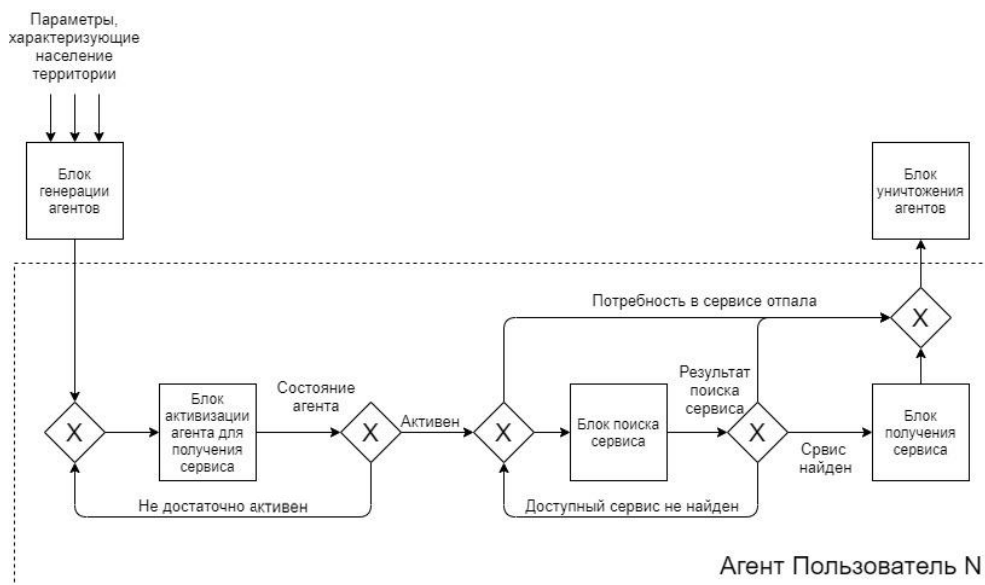


Рис. 5. Схема состояний агента пользователя медицинских услуг

4. Концепции проектирования.

4.1. Основные принципы:

– В условиях ограниченности медицинских ресурсов важнейшей задачей является их наиболее оптимальное распределение на территории. Под оптимальным распределением здесь понимается возможность обеспечения медицинскими сервисами наибольшего числа нуждающихся граждан. Для каждого человека одним из определяющих факторов является доступность медицинских услуг. Доступность во многом определяется существующей инфраструктурой, обеспечивающей доступ к сервису, и возможностью населения нести расходы на осуществление доступа и обслуживание. Исходными данными моделирования должны стать параметры динамики распределения нуждающихся в медицинских сервисах на территории, а также их возможности получить медицинские услуги. Наиболее приближенными к реальности в этой связи были бы АОМ, в которых в качестве агентов рассматриваются все граждане, проживающие на территории. Но в силу объективных сложностей получения реальных данных (учитывая их динамический характер), а также необходимости использования больших вычислительных ресурсов в настоящее время сделать это нереально. В связи с этим в представленной модели используется подход, в соответствии с которым предложено на основе качественного и количественного анализа состава населения территории и его пространственного размещения генерировать агентов, количество и характеристики которых отображали бы динамику появления нуждающихся в медицинском обслуживании граждан (агенты Клиент). Агенты *Клиент* ассоциируются с местами постоянного проживания людей на территории (узлы). В представленной концепции при генерации таких агентов нивелирован фактор мобильности населения (острая потребность в услугах может возникнуть на работе, загородном участке, во время посещения родственников и т. д). Данный момент может быть учтен при дальнейшем развитии модели. Для обеспечения возможности генерации агентов *Клиент* информация о параметрах населения территории должна ассоциироваться с узлами. При этом набор таких параметров может быть различным: распределение по полу, возрасту, социальному статусу, образованию и т. п. На основании этих данных определяется вероятность появления агента *Клиента* с определенными потребностями в получении медицинской услуги в конкретном узле. Таким образом, создаваемый агент *Клиент* характеризует не конкретную личность с совокупностью присущих ей характеристик здоровья, а личность, нуждающуюся в данный момент времени в конкретной медицинской услуге, находящуюся в определенном месте. При этом необходимо генерировать агента с конкретным набором характеристик (возраст, пол, социальный статус и др.), на основании которых определяется его дальнейшее поведение, связанное с выбором конкретного медицинского сервиса и способа доступа к нему. Для объективности картины происходящего в действительности в модели необходимо учитывать динамику степени потребности в медицинских услугах. Состояние здоровья человека может изменяться как в лучшую, так и в худшую сторону. В результате потребность в медицинском вмешательстве и в том и в другом случае может отпасть. Исходя из этого, агенты, параметры состояния которых изменились до критического уровня, а также агенты, которым

был предоставлен сервис в целях оптимизации вычислительного процесса, удаляются из модели.

– Медицинские сервисы в представленной концепции трактуются достаточно широко. В качестве них могут выступать услуга конкретного медицинского работника, медицинское обследование, лечение в стационаре и т. п. В соответствии с поставленной для моделирования целью отсутствует необходимость в отображении реальных процессов, связанных с организацией и качеством получения медицинских услуг. Важным является факт предоставления сервиса. В сервисе в каждый конкретный момент времени может быть заинтересовано множество потенциальных клиентов. Агент, отображающий сервис (агент *Сервис*), в каждый конкретный момент времени может обслуживать единственного клиента. В этом случае он находится в состоянии «занят». Все остальные должны ожидать окончания данного процесса. После освобождения агента *Сервис* им выбирается какой-либо клиент из очереди ожидающих агентов *Клиент*. Можно формировать различные стратегии выбора очередного клиента в модели поведения агента. Для получения реалистичной картины необходимо обеспечить возможность обслуживания в рамках расписания.

– Медицинские сервисы располагаются в определенных узлах. При этом они могут быть стационарными и мобильными (скорая медицинская помощь, обход пациентов участковым врачом и т. д.). В случае мобильных сервисов в процесс обслуживания включается перемещение агентов *Сервис* к месту расположения получателя услуги. Перемещение осуществляется по маршрутам. Маршруты не имеют прямой ассоциации с существующей транспортной инфраструктурой региона. Они больше соотносятся со способом перемещения: автобусный маршрут, авиаперелет, перемещение на такси, на личном транспорте, пешком и т. п. Маршрут может быть комплексным, т. е. сочетать в себе различные способы перемещения. Каждый маршрут соединяет два узла территории. Между двумя узлами может существовать несколько различных маршрутов. На уровне модели в качестве значимого параметра маршрута определено время перемещения по нему. Передвижение по маршрутам может осуществляться в рамках расписания (например, маршрут, реализуемый общественным транспортом). К стационарным медицинским сервисам перемещаются агенты *Клиент* с использованием маршрутов.

– Медицинские сервисы и маршруты имеют свою стоимость. Она, наравне с текущей загруженностью агентов *Сервис* и временем перемещения по маршруту, используется агентом *Клиент* в качестве параметров при принятии решения о выборе сервиса.

– Процесс моделирования заключается в многократном прогоне модели при размещении различного количества агентов *Сервис* в различных узлах. Количество сервисов может выступать в качестве ограничивающих критериев. Задача сводится к нахождению такой структуры размещения агентов *Сервис*, которая минимизирует количество необслуженных агентов *Клиент* в рамках периода моделирования.

4.2. Эмерджентность. В представленной концепции генерация агентов *Клиент*, с одной стороны, происходит на основании параметров населения территории, т. е. отображает реальную ситуацию, связанную с возникновением потребности в меди-

цинских услугах на определенной территории, а с другой стороны – появление агентов связано с определенной степенью вероятности. Заранее невозможно определить точное количество агентов *Клиент*, значения их параметров и места их размещения в любой момент времени функционирования модели. Поведение агентов *Клиент* по определению агента *Сервис* для получения услуги зависит от параметров самого агента и текущей структуры взаимодействия агентов *Клиент* с агентами *Сервис*. В результате возникает заранее непредсказуемая схема обслуживания и передвижения агентов по маршрутам, которая, в конечном счете, определяет анализируемые характеристики модели. Изменение каких-либо параметров модели (создание новых маршрутов, их расписания, удешевление, ускорение передвижения по ним, изменение мест размещения агентов *Сервис*, их количества, времени обслуживания, расписания, а также характеристик населения территории) существенно изменяет получаемый результат, и при этом просчитать его заранее невозможно.

4.3. Адаптация. Адаптивная способность реализуется на уровне поведения агентов *Клиент* при выборе ими агента *Сервис*. Оценка возможности выбора связана с оценкой собственных возможностей (определяются параметрами агента) и своим состоянием. При наличии альтернативных вариантов может быть выбран наиболее дешевый, либо наиболее быстрый, либо с определенным сочетанием данных характеристик, либо не выбран ни один. В последнем случае возможные повторные итерации выбора в изменившихся условиях появления новых альтернатив и изменения состояния агента.

4.4. Цели. Основная цель агентов *Клиент* при выборе агента *Сервис* – получение услуги при минимальных затратах с недопущением снижения состояния до некоторой критической отметки. При этом он должен учитывать, что может существовать вероятность улучшения состояния.

4.5. Обучение. В модели не предусмотрена возможность обучаемости агентов.

4.6. Прогнозирование. Предсказать ситуацию агент *Клиент* может исходя из анализа динамики изменения загруженности агентов *Сервис* и оценки своего текущего состояния с учетом опыта развития состояния у категорий людей со схожими характеристиками.

4.7. Ощущение. Агентам в модели доступны для восприятия параметры любых других агентов и элементов среды.

4.8. Взаимодействие. Прямого общения агентов друг с другом в модели не предполагается. Осуществляется синхронизация между агентом *Сервис* и агентом *Клиент* во время процесса обслуживания. Между агентами *Клиент* существует косвенное взаимодействие при выборе агента *Сервис* для обслуживания.

4.9. Стохастичность. В модели стохастичность присутствует в следующих процессах: генерация агентов *Клиент*; изменение состояния агента *Клиент*; выбор агентом *Клиент* агента *Сервис* для обслуживания; выбор агентом *Клиент* маршрута для передвижения к узлу размещения агента *Сервис*; определение времени обслуживания агентом *Сервис* агента *Клиент*; определение времени передвижения по маршруту.

4.10. Коллективы. В модели формирование коллективов не предусмотрено.

4.11. Наблюдение. Собираемые для тестирования, понимания и анализа данные из модели: Количество сгенерированных агентов Клиент; Количество обслуженных агентов Клиент; Количество агентов Клиент, выбывших из модели на основании равенства единице параметра «Состояние»; Время занятости агента Сервис; Время нахождения агентов Клиент в состоянии поиска сервиса; Время нахождения агентов Клиент в состоянии ожидания сервиса. Для каждого наблюдения определены параметры сбора. Пример для наблюдения Количество сгенерированных агентов Клиент: во время генерации агента значение предназначенной для этой цели переменной-счетчика увеличивается на единицу.

5. Инициализация. Начальное состояние модели характеризуется следующим.

Установленными значениями элементов окружения «Узел» и «Маршрут», соответствующими текущей ситуации для моделируемой территории.

Исследователями на основании установленных критериев (могут быть основаны на результатах какого-то анализа, либо отражать текущую ситуацию, либо задаваться произвольно) создается определенное количество агентов *Сервис*, которые размещаются по узлам.

Дальнейшие исследования модели предполагают возможность изменения количества агентов *Сервис*, мест их дислокации, варьирования их параметров.

6. Входные данные. Входные данные из внешних источников, предназначенные для представления процессов, которые меняются с течением времени, в данной модели не используются.

7. Подмодели. В данном разделе необходимо в деталях описать подмодели, представляющие процессы, перечисленные в разделе «Обзор процессов и планирование». Рассматриваемая модель является по своей сути шаблоном, в соответствии с которым может быть построено описание конкретных моделей, связанных с задачей пространственного размещения объектов здравоохранения. Поэтому в деталях подпроцессы описываются в контексте решаемой задачи.

Заключение

Основной целью представленного исследования являлась разработка концепции агент-ориентированных моделей, обеспечивающих процесс принятия решений по оптимальному пространственному размещению объектов инфраструктуры здравоохранения.

В своей работе мы попытались осуществить постановку задачи пространственного размещения объектов инфраструктуры здравоохранения с учетом социально-демографических параметров территории. Задача была сформулирована как распределение частично мобильных сервисов для мобильных пользователей. Осуществлено формальное описание задачи с точки зрения агент-ориентированного подхода с учетом пространственной составляющей. С использованием известного метода спецификации агент-ориентированных моделей проработана концептуальная структура модели. Она позволяет в наглядном виде продемонстрировать используемый подход. В настоящее время осуществляется практическая реализация агент-ориентированных моделей, в основе которых лежит разработанная концепция. Полноценная реализа-

ция нескольких моделей существующих территориальных систем здравоохранения позволит верифицировать используемый подход. Разработанная концепция в перспективе может быть использована для решения более широкого круга задач, связанных с пространственным размещением объектов социальной инфраструктуры.

В целом, представленная работа вносит вклад в развитие теоретических и прикладных аспектов создания агент-ориентированных моделей, связанных с предоставлением сервисов для социальных систем. Ее дальнейшее развитие видится, в первую очередь, в формировании моделей поведения агентов медицинской инфраструктуры по самостоятельному активному поиску для себя наиболее перспективных мест размещения (самоорганизации).

Список источников

Дианов С. В., Калашников К. Н. Использование агент-ориентированных моделей для поддержки принятия решений по пространственному размещению объектов здравоохранения // Социальные и экономические системы. 2021. № 6(24). С. 164–192.

Маковеев В.Н. Применение агент-ориентированных моделей в анализе и прогнозировании социально-экономического развития территорий // Экономические и социальные перемены: факты, тенденции, прогноз. 2016. № 5 (47). С. 272–289.

Чекмарева Е.А. Концептуальная модель воспроизводства трудового потенциала на муниципальном уровне: агент-ориентированный подход // Социальное пространство. 2017. № 4 (11). URL: <http://sa.isert-ran.ru/article/2376> (Дата обращения: 28. 10. 2022)

Alibrahim A., Wu S. An agent-based simulation model of patient choice of health care providers in accountable care organizations // Health Care Manag Sci. 2018. Vol. 21(1). Pp. 131–43. <https://doi.org/10.1007/s10729-016-9383-1>

Brenner S., Zeng Z., Liu Y., Wang J., Li J. and Howard P.K. Modeling and analysis of the emergency department at university of Kentucky Chandler Hospital using simulations // J. Emerg. Nurs. 2010. Vol. 36. № 4. Pp. 303–310

Cassidy R., Singh N.S., Schiratti P.R. et al. Mathematical modelling for health systems research: a systematic review of system dynamics and agent-based models // BMC Health Services Research. 2019. Vol. 19. № 845. <https://doi.org/10.1186/s12913-019-4627-7>

Charfeddine M., Montreuil B. Integrated agent-oriented modeling and simulation of population and healthcare delivery network: application to COPD chronic disease in a Canadian region // Simulation Conference (WSC). 2010. Pp. 2327–2339. doi: 10.1109/WSC.2010.5678930.

Einzinger P., Popper N., Breitenacker F., Pfeiffer N., Jung R., Endel G. The GAP-DRG Model: Simulation of Outpatient Care for Comparison of Different Reimbursement Schemes // 2013 Winter Simulations Conference. 2013. Pp. 2299–2308 doi: 10.1109/WSC.2013.6721605

El-Sayed A.M., Scarborough P., Seemann L., Galea S. Social network analysis and agent-based modeling in social epidemiology // Epidemiol. Perspect. Innov. 2012. № 9(1). Pp. 1.

Hupert N., Xiong W., Mushlin A. The virtue of virtuality: the promise of agent-based epidemic modeling // Transl. Res. J. Lab. Clin. Med. 2008. № 151(6). Pp. 273–274.

Huttschenreuter A.K., Bosman P.A.N., Blonk-Altena I., van Aarle J. and La Poutré H. A gent-based patient admission scheduling in hospitals // Belgian/Netherlands Artificial Intelligence Conference. 2008. Pp. 315–316.

Jones S.S. and Evans R.S. An agent based simulation tool for scheduling emergency department physicians // AMIA Annu. Symp. Proc. 2008. Pp. 338–342.

Bonabeau E. Agent-based modeling: methods and techniques for simulating human systems // PNAS. 2002. Vol. 99(3). Pp. 7280–7287.

Lee B.Y., Brown S.T., Korch G.W., Cooley P.C., Zimmerman R.K., Wheaton W.D., Zimmer S.M., Grefenstette J.J., Bailey R.R., Assi T.-M. and Burke D. S. A computer simulation of vaccine prioritization, allocation, and rationing during the 2009 H1N1 influenza pandemic // Vaccine. 2010. Vol. 28. № 31. Pp. 4875–4879.

Liu Z., Cabrera E., Rexachs D., Luque E. A generalized agent-based model to simulate emergency departments // The sixth International Conference on Advances in System Simulation. 2014. Available at: https://www.researchgate.net/publication/282571815_A_Generalized_Agent-Based_Model_to_Simulate_Emergency_Departments (accessed: 28.10.2022).

Nianogo R.A., Arah O.A. Agent-based modeling of noncommunicable diseases: a systematic review // Am. J. Public Health. 2015. Vol. 105(3). Pp. 20–31.

Paulussen T. O., Zöller A., Heinzl A., Braubach L., Pokahr A. and Lamersdorf W. Patient scheduling under uncertainty // Proceedings of the 2004 ACM symposium on Applied computing. 2004. Pp. 309–310. <https://doi.org/10.1145/967900.967966>

Paulussen T.O. et al. Agent-Based Patient Scheduling in Hospitals // Multiagent Engineering. International Handbooks on Information Systems. Springer, Berlin, Heidelberg. 2006. Pp. 255–275. https://doi.org/10.1007/3-540-32062-8_14

Rohleder T.R., Lewkonja P., Bischak D.P., Duffy P. and Hendi jani R. Using simulation modeling to improve patient flow at an outpatient orthopedic clinic // Health Care Manag. Sci. 2011. Vol. 14(2). Pp. 135–145.

Silverman B.G., Hanrahan N., Bharathy G., Gordon K., Johnson D. A systems approach to healthcare: Agent-based modeling, community mental health, and population well-being // Artificial Intelligence in Medicine. 2015. Vol. 63(2). Pp. 61–71. <https://doi.org/10.1016/j.artmed.2014.08.006>

Tracy M., Cerdá M. and Keyes K.M. Agent-Based Modeling in Public Health: Current Applications and Future Directions // Annual Review of Public Health. 2018. Vol. 39. Pp. 77–94. doi: 10.1146/annurev-publhealth-040617-014317

Vasilakis C. and El-Darzi E. A Simulation Study of the Winter Bed Crisis // Health Care Management Science. 2001. Vol. 4. Pp. 31–36. <https://doi.org/10.1023/A:1009649615548>

Yousefi M., Yousefi M., Fogliatto F.S., Ferreira R.P.M., Kim J.H. Simulating the behavior of patients who leave a public hospital emergency department without being seen by a physician: a cellular automaton and agent-based framework // Brazilian Braz J Med Biol Res. 2018. Vol. 51(3). <https://doi.org/10.1590/1414-431X20176961>

Yousefi M., Ferreira R. An agent-based simulation combined with group decision-making technique for improving the performance of an emergency department // Braz J Med Biol Res. 2017. Vol. 50(5). <https://doi.org/10.1590/1414-431X20175955>

References

Дианов С. В. Iспол'zovanie agent-orientirovannykh modelei dlia podderzhki priniatiia reshenii po prostranstvennomu razmeshcheniiu ob'ektov zdravookhraneniia [Application of agent-based models to support decision-making on the spatial placement of healthcare facilities]. *Sotsial'nye i ekonomicheskie sistemy* [Social and economic systems], 2021, no. № 6 (24), pp. 164–192.

Makoveev V. N. Primenenie agent-orientirovannykh modelei v analize i prognozirovanii sotsial'no-ekonomicheskogo razvitiia territorii [Using agent-based models in the analysis and forecast of

socio-economic development of territories]. *Ekonomicheskie i sotsial'nye peremeny: fakty, tendentsii, prognoz* [Economic and Social Changes: Facts, Trends, Forecast], 2016, no. 5 (47), pp. 272–289.

Chekmareva E. A. Kontseptual'naia model' vosproizvodstva trudovogo potentsiala na munitsipal'nom urovne: agent-orientirovannyi podkhod [Concept model of labor potential reproduction at the municipal level: an agent-based approach]. *Sotsial'noe prostranstvo* [Social area], 2017, no. 4 (11). Available at: <http://sa.isert-ran.ru/article/2376> (accessed: 28.10.2022).

Alibrahim A., Wu S. An agent-based simulation model of patient choice of health care providers in accountable care organizations. *Health Care Manag Sci*, 2018, vol. 21 (1), pp. 131–43. <https://doi.org/10.1007/s10729-016-9383-1>.

Brenner S., Zeng Z., Liu Y., Wang J., Li J. and Howard P. K. Modeling and analysis of the emergency department at university of Kentucky Chandler Hospital using simulations. *J. Emerg. Nurs*, 2010, vol. 36, no. 4, pp. 303–310.

Cassidy R., Singh N.S., Schiratti P.R. et al. Mathematical modelling for health systems research: a systematic review of system dynamics and agent-based models. *BMC Health Services Research*, 2019, vol. 19, no. 845. <https://doi.org/10.1186/s12913-019-4627-7>.

Charfeddine M., Montreuil B. Integrated agent-oriented modeling and simulation of population and healthcare delivery network: application to COPD chronic disease in a Canadian region. *Simulation Conference (WSC)*, 2010, pp. 2327–2339. doi: 10.1109/WSC.2010.5678930.

Einzinger P., Popper N., Breitenacker F., Pfeffer N., Jung R., Endel G. The GAP-DRG Model: Simulation of Outpatient Care for Comparison of Different Reimbursement Schemes. *2013 Winter Simulations Conference*, 2013, pp. 2299–2308 doi: 10.1109/WSC.2013.6721605.

El-Sayed A.M., Scarborough P., Seemann L., Galea S. Social network analysis and agent-based modeling in social epidemiology. *Epidemiol. Perspect. Innov*, 2012, no. 9 (1), pp. 1.

Hupert N., Xiong W., Mushlin A. The virtue of virtuality: the promise of agent-based epidemic modeling. *Transl. Res. J. Lab. Clin. Med*, 2008, no. 151 (6), pp. 273–274.

Hutzschenreuter A.K., Bosman P.A.N., Blonk-Altena I., van Aarle J. and La Poutré H. A gent-based patient admission scheduling in hospitals. *Belgian/Netherlands Artificial Intelligence Conference*, 2008, pp. 315–316.

Jones S.S. and Evans R.S. An agent based simulation tool for scheduling emergency department physicians. *AMIA Annu. Symp. Proc.*, 2008, pp. 338–342.

Bonabeau E. Agent-based modeling: methods and techniques for simulating human systems. *PNAS*, 2002, vol. 99 (3), pp. 7280–7287.

Lee B.Y., Brown S.T., Korch G.W., Cooley P.C., Zimmerman R.K., Wheaton W.D., Zimmer S.M., Grefenstette J.J., Bailey R.R., Assi T.-M. and Burke D. S. A computer simulation of vaccine prioritization, allocation, and rationing during the 2009 H1N1 influenza pandemic. *Vaccine*, 2010, vol. 28, no. 31, pp. 4875–4879.

Liu Z., Cabrera E., Rexachs D., Luque E. A generalized agent-based model to simulate emergency departments. *The sixth International Conference on Advances in System Simulation*, 2014. Available at: https://www.researchgate.net/publication/282571815_A_Generalized_Agent-Based_Model_to_Simulate_Emergency_Departments (accessed: 28.10.2022).

Nianogo R.A., Arah O.A. Agent-based modeling of noncommunicable diseases: a systematic review. *Am. J. Public Health*, 2015, vol. 105(3), pp. 20–31.

Paulussen T. O., Z"oller A., Heinzl A., Braubach L., Pokahr A. and Lamersdorf W. Patient scheduling under uncertainty. *Proceedings of the 2004 ACM symposium on applied computing*, 2004, pp. 309–310. <https://doi.org/10.1145/967900.967966>.

Paulussen T.O. et al. Agent-Based Patient Scheduling in Hospitals. *Multiagent Engineering. International Handbooks on Information Systems*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2006, pp. 255–275. https://doi.org/10.1007/3-540-32062-8_14.

Rohleder T.R., Lewkonja P., Bischak D.P., Duffy P. and Hendi jani R. Using simulation modeling to improve patient flow at an outpatient orthopedic clinic. *Health Care Manag. Sci.*, 2011, vol. 14 (2), pp. 135–145.

Silverman B.G., Hanrahan N., Bharathy G., Gordon K., Johnson D. A systems approach to healthcare: Agent-based modeling, community mental health, and population well-being. *Artificial Intelligence in Medicine*, 2015, vol. 63 (2), pp. 61–71. <https://doi.org/10.1016/j.artmed.2014.08.006>

Tracy M., Cerdá M. and Keyes K.M. Agent-Based Modeling in Public Health: Current Applications and Future Directions. *Annual Review of Public Health*, 2018, vol. 39, pp. 77–94. doi: 10.1146/annurev-publhealth-040617-014317.

Vasilakis C. and El-Darzi E. A Simulation Study of the Winter Bed Crisis. *Health Care Management Science*, 2001, vol. 4, pp. 31–36. <https://doi.org/10.1023/A:1009649615548>.

Yousefi M, Yousefi M, Fogliatto F.S., Ferreira R.P.M., Kim J.H. Simulating the behavior of patients who leave a public hospital emergency department without being seen by a physician: a cellular automaton and agent-based framework. *Brazilian Braz J Med Biol Res.*, 2018, vol. 51 (3) <https://doi.org/10.1590/1414-431X20176961>.

Yousefi M., Ferreira R. An agent-based simulation combined with group decision-making technique for improving the performance of an emergency department. *Braz J Med Biol Res.*, 2017, vol. 50 (5). <https://doi.org/10.1590/1414-431X20175955>.

Сведения об авторах

Швецов Анатолий Николаевич – доктор технических наук, профессор, <https://orcid.org/0000-0002-7021-5184>, smithv@mail.ru, Вологодский государственный университет (д. 15, ул. Ленина, 160000 г. Вологда, Российская Федерация); **Anatoly N. Shvetsov** – Doctor of Technical Sciences, Professor, <https://orcid.org/0000-0002-7021-5184>, smithv@mail.ru, Vologda State University (15, ul. Lenina, 160000 Vologda, Russian Federation).

Дианов Сергей Владимирович – кандидат технических наук, <https://orcid.org/0000-0001-8297-8077>, dianov.sv@mail.ru, Вологодский государственный университет (д. 15, ул. Ленина, 160000 г. Вологда, Российская Федерация); **Sergey V. Dianov** – Candidate of Technical Sciences, <https://orcid.org/0000-0001-8297-8077>, dianov.sv@mail.ru, Vologda State University (15, ul. Lenina, 160000 Vologda, Russian Federation).

Дианов Даниил Сергеевич – аспирант, <https://orcid.org/0000-0003-4766-8801>, daniil.dianov@gmail.com, Вологодский научный центр РАН (д. 56а, ул. Горького 160014 г. Вологда, Российская Федерация); **Daniil S. Dianov** – Postgraduate student, <https://orcid.org/0000-0003-4766-8801>, daniil.dianov@gmail.com, Vologda Scientific Center of the Russian Academy of Sciences (56a, ul. Gor'kogo 160014 Vologda, Russian Federation).

Сидоренко Екатерина Эдуардовна – студент, katerin02ka08@gmail.com, Вологодский государственный университет (д. 15, ул. Ленина, 160000 г. Вологда, Российская Федерация); **Ekaterina E. Sidorenko** – Student, katerin02ka08@gmail.com, Vologda State University (15, ul. Lenina, 160000 Vologda, Russian Federation).

Зорин Дмитрий Алексеевич – студент, dima.zorin.2015@mail.ru, Вологодский государственный университет (д. 15, ул. Ленина, 160000 г. Вологда, Российская Федерация); **Dmitry A. Zorin** – Student, dima.zorin.2015@mail.ru, Vologda State University (15, ul. Lenina, 160000 Vologda, Russian Federation).

Заявленный вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article. The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 02.11.2022; одобрена после рецензирования 06.12.2022; принята к публикации 20.12.2022.

The article was submitted 02.11.2022; Approved after reviewing 06.12.2022; Accepted for publication 20.12.2022.