

ТЕОРЕТИКО-МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ К ИССЛЕДОВАНИЮ СОЦИАЛЬНОГО ПРОСТРАНСТВА

DOI: 10.15838/sa.2025.4.48.7

УДК 303.094.7 | ББК 87.256.631.0

© Ригин В.А., Дианов Д.С.

ОСОБЕННОСТИ РАЗРАБОТКИ ПРОТОТИПА АГЕНТ-ОРИЕНТИРОВАННОЙ МОДЕЛИ СИСТЕМЫ РЕГИОНАЛЬНОГО ЗДРАВООХРАНЕНИЯ НА ПРИМЕРЕ ВОЛОГОДСКОЙ ОБЛАСТИ



ВАСИЛИЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ РИГИН

Вологодский научный центр Российской академии наук

Вологда, Российская Федерация

e-mail: var@vscc.ac.ru

ORCID: 0000-0001-6359-1192



ДАНИИЛ СЕРГЕЕВИЧ ДИАНОВ

Вологодский научный центр Российской академии наук

Вологодский государственный университет

Вологда, Российская Федерация

e-mail: daniil.dianov@gmail.com

ORCID: 0000-0003-4766-8801 ResearcherID: ADK-8080-2022

Исследование посвящено созданию прототипа агент-ориентированной модели региональной системы здравоохранения Вологодской области. Целью работы является интеграция пространственно-географических параметров размещения инфраструктуры здравоохранения и поведенческих особенностей населения региона. Разработанная модель включает функциональные модули первичной и специализированной медицинской помощи, экстренной помощи и специализированных центров, что позволяет детально исследовать процессы взаимодействия пациентов с системой здравоохранения. Методологической основой исследования служит концепция имитационного моделирования, широко используемая для анализа сложных социально-экономических систем. Моделируемые сценарии позволяют проводить виртуальные эксперименты, оценивать влияние управленческих решений и предлагать рекомендации по улучшению качества предоставляемых медицинских услуг. Практическое применение модели предусматривает определение оптимальной стратегии распределения ресурсов и организацию эффективной сети медицинских учреждений. Результаты моделирования помогают выявить проблемные зоны, оценить доступность медицинской помощи и предложить мероприятия по повышению качества обслуживания

населения. Таким образом, представленная работа направлена на повышение эффективности функционирования региональной системы здравоохранения и формирование комплекса мер, ориентированных на конкретные региональные потребности и характеристики населения. Это способствует принятию научно обоснованных управленческих решений, направленных на достижение целей устойчивого развития региона в области охраны здоровья населения.

Агент-ориентированное моделирование, система регионального здравоохранения.

Благодарность

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-28-01783 (<https://rscf.ru/project/24-28-01783/>).

Введение

Современные региональные системы здравоохранения характеризуется высоким уровнем институциональной и технологической сложности, обусловленной значительным потребительским спросом и необходимостью внедрения инновационных технологий. Эффективное функционирование систем регионального здравоохранения требует значительных материальных и организационных затрат, распределение которых осуществляется посредством методов ресурсного обеспечения, отличающихся недостаточной оптимальностью. Вследствие этого возникает объективная потребность в разработке новейших научно обоснованных методологических подходов, направленных на повышение качества процессов принятия управленческих решений в сфере здравоохранения. Перспективным инструментом формализации и верификации управленческих решений, обеспечивающим эффективное функционирование региональной системы здравоохранения посредством учета объективных региональных особенностей и потребностей населения территорий выступает агент-ориентированное моделирование. На предыдущем этапе исследования была разработана концептуальная схема модели системы регионального здравоохранения (Нацун и др. 2024), включающая несколько функциональных модулей: первичная медицинская помощь; специализированная медицинская помощь в амбулаторных условиях (профили – кардиология, онкология, акушерство и гинекология, гериатрия), специализированная медицинская помощь в условиях круглосуточного стационара (по отдельным

профилям), экстренная медицинская помощь. Основная цель представленного исследования заключается в конструировании прототипа агент-ориентированной модели региональной системы здравоохранения Вологодской области. Для ее достижения необходимо решить следующие задачи:

- определить понятие системы здравоохранения Вологодской области, детализировать основные ее структуры и представляющих их агентов «медицинские учреждения»;
- провести детализацию агентов «человек», представляющих население Вологодской области;
- детализировать дополнительные типы агентов, а также общие алгоритмы взаимодействия всех представленных агентов в рамках всей системы;
- выполнить компьютерную реализацию спроектированной системы с учетом ее масштабов и ограниченности вычислительных ресурсов.

Данная модель интегрирует пространственно-географические параметры размещения инфраструктуры системы здравоохранения и поведенческие особенности населения региона относительно взаимодействия с элементами системы здравоохранения. Реализация прототипа агент-ориентированной модели региональной системы здравоохранения Вологодской области позволит разработать комплекс организационно-управленческих мероприятий, адекватно отражающих специфику региона, обеспечения доступности оказания медицинской помощи и эффективность процессов, направленных на улучшение качествен-

ных показателей функционирования региональной системы здравоохранения.

Материалы и методы

Имитационное моделирование представляет собой активно развивающийся методический инструментарий, широко применяемый как в зарубежной, так и в отечественной исследовательской деятельности для изучения динамики функционирования комплексных социально-экономических систем (Макаров, 2013; Pyka, Werker, 2009; Edmonds, 2010). Данный научный подход демонстрирует высокую эффективность при анализе масштабных вопросов социально-экономического контекста (Макаров, Бахтизин, 2013; Окрепилов и др., 2015; Okrepilov et al., 2015; Makarov et al., 2018). С научной точки зрения метод агент-ориентированного моделирования представляется приоритетным инструментом конструирования реалистичных моделей территориальной локализации объектов социальной инфраструктуры и оптимизации логистических потоков населения в условиях регионального пространства. Универсальность подхода определяется возможностью адаптации данной технологии к разнообразным сферам государственного управления, включающим городское планирование, систему образования и здравоохранение. Эффективность и адаптивность методики обоснованы результатами зарубежных исследований (Mendritzki, 2010; Dawid, Neugart, 2011; Gaffard, Napoletano, 2012; Silverman, 2014; Badham et al., 2018). Тем не менее качество результатов существенно зависит от корректности задаваемых начальных условий и параметров модели, адекватно отражающих специфику управленческих процессов и условия деятельности конкретных отраслей экономики.

Научное сообщество России также уделяет внимание данному направлению, результаты соответствующих разработок представляют преимущественно сотрудники ЦЭМИ РАН под руководством академика В.Л. Макарова (Бахтизин, 2008; Макаров и др., 2016; Макаров и др., 2019). Эффективность применения агент-ориен-

тированных моделей в пространственно-распределенных системах обоснована в работах российских исследователей (Дианов и др., 2024). Использование агент-ориентированной методологии в сфере здравоохранения отличается повышенной значимостью вследствие способности учитывать поведение отдельных индивидов и коллективных субъектов системы здравоохранения. Этот подход, первоначально применяемый преимущественно для анализа динамики эпидемиологических угроз (Tracy et al., 2018), сегодня распространяется на широкий спектр задач, связанных с обеспечением общественного здоровья, включая выявление коренных механизмов формирования негативных тенденций в состоянии здоровья населения и проведение прогностической оценки последствий возможных вмешательств. Концептуальные вопросы построения агент-ориентированных моделей, обеспечивающих процесс принятия решений по оптимальному пространственному размещению объектов инфраструктуры здравоохранения, были исследованы группой ученых (Дианов, 2022; Швецов, 2023).

Нами в работе была поставлена задача пространственного размещения объектов инфраструктуры здравоохранения с учетом социально-демографических параметров территории. Разработанная концепция в перспективе может быть использована для решения более широкого круга задач, связанных с пространственным размещением объектов социальной инфраструктуры. Ключевые задачи агент-ориентированного моделирования в контексте здравоохранения включают идентификацию детерминирующих паттернов и факторов риска, обуславливающих состояние здоровья различных демографических и социальных групп населения. Существенным достоинством данного метода выступает способность учитывать временные изменения свойств изучаемых объектов, динамику их пространственного распределения, а также структуру взаимосвязей между ними. Агент-ориентированные модели позволяют интегрировать алгоритмы оптимизации непосредственно в механизм

функционирования системы, где агенты могут действовать самостоятельно, обладая индивидуальной моделью поведения, взаимодействуя друг с другом. Применение виртуальных экспериментов позволяет тестировать меры профилактического и лечебного характера до реализации реальных изменений, обеспечивая высокую степень предсказуемости итоговых эффектов.

Результаты

Проведена разработка прототипа агент-ориентированной модели системы регионального здравоохранения (на примере Вологодской области).

Муниципальная структура Вологодской области включает 28 муниципальных обра-

зований, из них два крупных города (Вологда, Череповец) с численностью населения более 300 тыс. человек и 26 округов (районов) с суммарной численностью населения более 500 тыс. человек. Население между округами распределено неравномерно: от порядка 5 тыс. человек в Междуреченском округе до порядка 50 тыс. человек в Вологодском и Великоустюгском округах. При этом порядка 50% населения в округах, за исключением Вологодского и Череповецкого, проживает на территории административных центров (табл. 1).

Медицинские учреждения системы регионального здравоохранения разделяются по некоторым критериям (рис. 1). По критерию обслуживаемой области: районные

Таблица 1. Распределение населения Вологодской области по муниципальным образованиям

№	Муниципальное образование	Население муниципального образования, чел.	Административный центр	Население адм. центра округа, чел.	Доля проживающих в адм. центре округа, %
1	город Вологда	317822	город Вологда		
2	город Череповец	298160	город Череповец		
3	Вологодский округ	52745	город Вологда		
4	Великоустюгский округ	49825	город Великий Устюг	28266	57
5	Сокольский округ	45129	город Сокол	34298	76
6	Череповецкий округ	39222	город Череповец		
7	Грязовецкий округ	32078	город Грязовец	14424	45
8	Шекснинский округ	29037	пгт Шексна	16048	55
9	Вытегорский округ	22200	город Вытегра	10292	46
10	Тотемский округ	22064	город Тотьма	8647	39
11	Бабаевский округ	19014	город Бабаево	11646	61
12	Никольский округ	18845	город Никольск	7607	40
13	Кадуйский округ	16512	пгт Кадуй	11373	69
14	Устюженский округ	15333	город Устюжна	7653	50
15	Кичменгско-Городецкий округ	14475	село Кичменгский Городок	6103	42
16	Кирилловский округ	14088	город Кириллов	7069	50
17	Вожегодский округ	13814	пгт Вожега	6015	44
18	Белозерский округ	13492	город Белозерск	8183	61
19	Харовский округ	12976	город Харовск	8361	64
20	Верховажский округ	12561	село Верховажье	4843	39
21	Чагодощенский округ	11110	пгт Чагода	5603	50
22	Тарногский округ	10460	село Тарногский Городок	4927	47
23	Бабушкинский округ	9641	село имени Бабушкина	3842	40
24	Нюксенский округ	8521	село Нюксеница	4333	51
25	Сямженский округ	8049	село Сямжа	3967	49
26	Усть-Кубинский округ	7373	село Устье	4176	57
27	Вашкинский округ	6148	село Липин Бор	3364	55
28	Междуреченский округ	4918	село Шуйское	2220	45

Источник: составлено авторами.



Рис. 1. Система регионального здравоохранения

Источник: составлено авторами.

(центральные районные больницы – ЦРБ), городские (Вологда, Череповец) и областные учреждения (обслуживающие все население региона); по возрастному критерию: детские и взрослые учреждения; по типу оказываемой медицинской помощи: учреждения первичной медицинской помощи (поликлиники, фельдшерско-акушерские пункты, скорая неотложная помощь, травмпункты), специализированной медицинской помощи (больницы, стационары, диспансеры) и вспомогательные учреждения, не оказывающие медицинскую помощь непосредственным образом (бухгалтерия, склад, аптеки и информационно-аналитический центр); отдельно следует выделить образовательные медицинские учреждения, центры медицинской профилактики и санатории. Кроме государственных медицинских учреждений в крупных городах распространены частные медицинские организации, в основном оказывающие населению медицинские услуги, связанные с различными обследованиями, анализами и приемами врачей-специалистов, на платной основе. Центральные районные больницы (ЦРБ) требуется рассматривать отдельно, так как они представляют комплексные объекты, выполняющие функции поликлиники, больничного стационара, скорой помощи и обладающие сетью фельдшерско-акушерских пунктов (ФАП), распределенных по территории района. При выявлении заболевания пациенты обращаются в медицинские учреждения первичного звена, в зависимости от необходимой формы медицинской помощи, в экстренной форме обращение идет в скорую помощь, в случае неотложной помощи обращение идет в отделение неотложной помощи поликлиники, ФАП либо формируется вызов врача или фельдшера на дом, при необходимости плановой помощи пациент записывается на прием к участковому терапевту или фельдшеру. Кроме того, пациенты могут обращаться в первичное медучреждение в профилактических целях, в рамках диспансеризации или профосмотров, плановой медицинской помощи. Отдельно выделяется роль участкового врача или фельдшера, ко-

торый формирует траекторию лечения или диагностики, направляет пациента на медицинские обследования и к врачам-специалистам, осуществляет подготовку обследований в случае плановой госпитализации в стационар. В поликлиниках осуществляется прием пациентов врачами-специалистами (хирург, офтальмолог, кардиолог, травматолог, оториноларинголог, уролог и др.). Вспомогательные службы поликлиник: клинико-диагностическая лаборатория, ультразвуковая диагностика, рентген и флюорография, эндоскопическая диагностика, функциональная диагностика, медицинские процедуры (инъекции, прививки), физиотерапевтические процедуры.

Конкретная траектория взаимодействия пациента с сервисами медицинского учреждения определяется протоколом лечения заболевания или протоколом диагностики (рис. 2).

Медицинские организации первичного звена осуществляют помощь только в амбулаторном режиме, в зависимости от заболевания пациентам может быть предложена плановая госпитализация в дневной или круглосуточный стационар больницы. Эти особенности учтены в модели агентов «медицинских учреждений», модели данных агентов представляют собой множество медицинских сервисов с сетевой структурой, предоставляющих агентам «человек» (совокупность агентов тип «человек» можно трактовать как агенты «население») медицинские услуги в рамках заболеваемости или профилактики. У данных агентов имеется специализация по возрасту: детские, взрослые; по виду помощи: первичная (поликлиника, ФАП, скорая помощь), специализированная (больница, диспансер); по привязке к территории: районные (указывается конкретный округ и населенный пункт), городские (Вологда, Череповец), областные (указывается местонахождение).

Для удобства построения модели был введен дополнительный тип агента – агент «заболеваемость», представляющий собой заболевание определенного класса согласно классам международной классификации



Рис. 2. Типовая схема агента «медицинское учреждение» типа поликлиники

Источник: составлено авторами.

болезней (МКБ-10): болезни системы кровообращения; болезни органов дыхания; болезни костно-мышечной системы и соединительной ткани; болезни глаза и его придаточного аппарата; болезни эндокринной системы, расстройства питания и нарушения обмена веществ; болезни мочеполовой системы; болезни органов пищеварения; травмы, отравления и другие последствия воздействия внешних причин; беременность, роды и послеродовой период; новообразования; болезни нервной системы, болезни уха и сосцевидного отростка; психические расстройства и расстройства поведения; некоторые инфекционные и паразитарные болезни.

Агент «заболевание» может выбирать агента «человек» вероятностным способом с учетом его параметров (например, пол и возраст и др.). Предполагается, что выбранный агент на текущий момент не болеет данным классом заболевания. Агент «заболевание» взаимодействует с агентом «чело-

век», что становится поводом для обращения в медучреждение. Еще одной характеристикой агента «заболевание» является тип протекания заболевания, определим его как однократный или хронический. При однократном типе заболевания агент «заболевание» уничтожается после завершения лечения. При хроническом типе заболевания учитывается жизненный цикл заболевания. Так, при хронических и онкологических заболеваниях отмечают стадию ремиссии, т. е. периоды улучшения (уменьшения или исчезновения симптомов) и возможного обострения или рецидива, где ремиссия — не излечение, а временное затишье, требующее продолжения наблюдения и лечения для предотвращения рецидива (возвращения болезни). Ремиссия, наступающая после лечения, может быть полной (полное отсутствие симптомов и признаков) или частичной (симптомы ослаблены), но всегда несет риск возврата болезни, требуя регулярного контроля у врача и соблюдения рекоменда-

ций. В случае хронического типа заболевания агент «заболевание» не уничтожается при взаимодействии с медицинскими сервисами, а входит в состояние ремиссии, которое в процессе жизни может переходить в состояние обострения, что будет являться причиной обращения агента «человек» в медучреждение. Распределение по типам протекания заболевания зависит от класса заболевания. Можно отметить, что заболевания системы кровообращения и связанные с новообразованиями в большинстве случаев являются хроническими, а болезни органов дыхания чаще являются однократными. Количество агентов «заболевание» зависит от уровня первичной прогнозной заболеваемости (табл. 2).

Агенты типа «заболевание» создаются однократно в начале модельного года и должны вступить во взаимодействие с агентами типа «человек» до конца модельного года, при смене года агенты данного типа заново создаются, количество и свойства новых агентов формируются на основе прогнозных оценок или предположений.

Агенты типа «человек» имеют следующие параметры: пол, возраст, состояние (здоров, болен, ремиссия, умер), место жительства (Вологда, Череповец, административный центр округа, другие поселения округа), предрасположенности (курение, алкоголизм, наркомания, ЗОЖ), уровень дохода (низкий, средний, высокий), медицинская карта (перечень перенесенных заболеваний по классам с датой, на начальном шаге не определяется имеет нулевые значения), занятость (работает, не работает), дети (только для женщин, связи с другими агентами возрастом до 14 лет).

Агент «человек» после взаимодействия с агентом «заболевание» меняет свое состояние на «болен» и вступает во взаимодействие с первичными медучреждениями (при экстренной форме через скорую помощь, при неотложной форме через отделение неотложной помощи поликлиники, ФАП или через вызов врача на дом) в зависимости от своего местожительства. Выбор формы помощи вероятностный на основе статистических

Таблица 2. Заболеваемость проживающих в районе обслуживания лечебного учреждения на 100 тыс. человек населения, чел., значение показателя за год

Класс заболевания	2015	2020	2024
Все заболевания		148 988,2	175 640,1
Болезни системы кровообращения	26 093,3	28 213	34 706,9
Болезни органов дыхания	19 036,7	28 433,5	31 959,4
Болезни костно-мышечной системы и соединительной ткани	14 068,2	15 440,5	21 506,7
Болезни глаза и его придаточного аппарата	12 951,5	11 453,8	12 550,9
Болезни эндокринной системы, расстройства питания и нарушения обмена веществ	8 839,7	10 225,6	12 517,5
Болезни мочеполовой системы	10 023,6	10 073,7	11 030,9
Болезни органов пищеварения	6 923,9	7 490,1	9 118,4
Травмы, отравления и другие последствия воздействия внешних причин	7 054,4	6 990,5	8 388
Беременность, роды и послеродовой период	8 672,3	6 991,6	7 964,5
Новообразования	4 145,2	4 584,2	6 734,9
Болезни нервной системы	3 195,3	3 753,6	4 823,8
Болезни уха и сосцевидного отростка	3 538	3 410,7	4 409
Психические расстройства и расстройства поведения	5 250,7	4 303,8	4 335,3
Некоторые инфекционные и паразитарные болезни	3 293,5	2 802,7	2 934,5

Источник: составлено авторами.

данных обращений в скорую помощь. Кроме того, изменение состояния агента в «болен» и последующее обращение в медучреждение происходит в случае перехода связанного агента «заболевание» в фазу обострения (при хронической форме заболевания), порядок действий аналогичный. Дальнейшее взаимодействие человека и медучреждения может происходить в форме госпитализации в больницу или в форме амбулаторного лечения в плановом порядке (рис. 3).

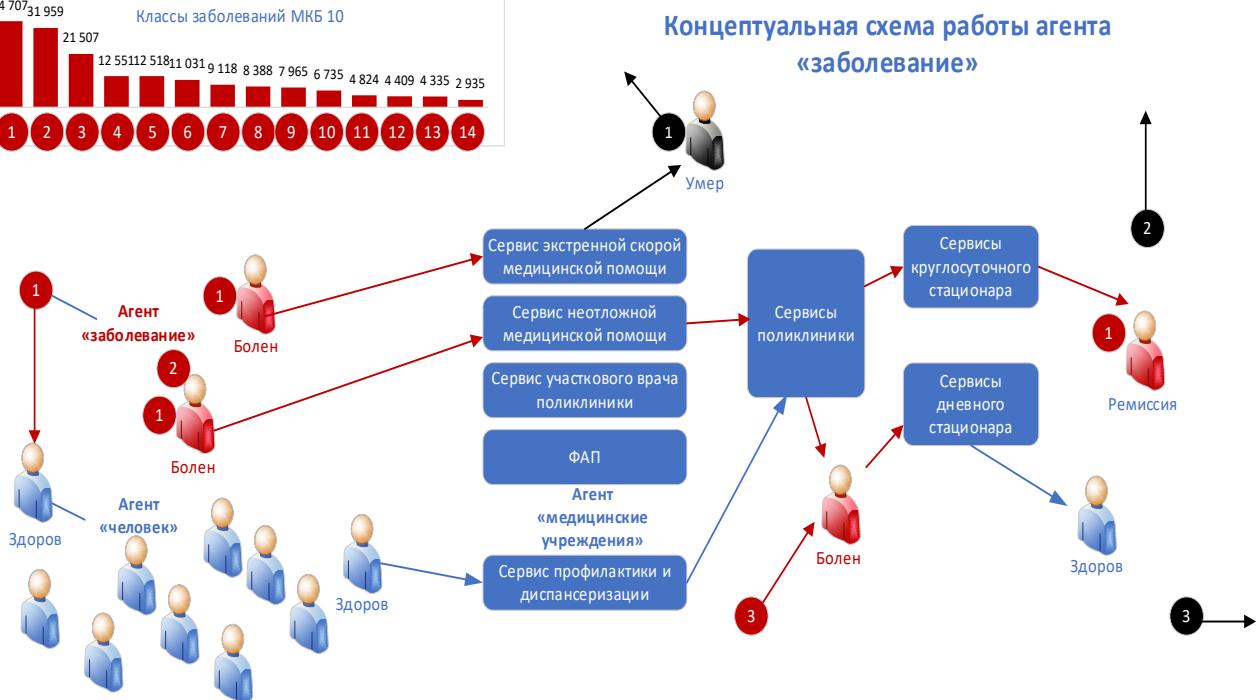


Рис. 3. Концептуальная схема работы агента «заболевание»

Источник: составлено авторами.

После проведения успешного взаимодействия состояние агента «человек» меняется на «здоров» или «ремиссия», а соответствующий агент «заболевание» утилизируется (кроме хронических), в случае неуспешного завершения состояние агента меняется на «умер», сроки взаимодействия определяются исходя из классов заболеваний вероятностным способом на основе статистических данных (*табл. 3*).

На переход агента в состояние «умер» влияют пол, возраст, имеющиеся хрони-

Таблица 3. Умершие по основным классам причин смерти по Вологодской области за 2023 год

Класс заболеваний	2023 год
Всего умерших	15487
от некоторых инфекционных и паразитарных болезней	97
новообразований	2491
болезней системы кровообращения	8852
болезней органов дыхания	710
болезней органов пищеварения	947
внешних причин	1174
новой коронавирусной инфекции (COVID-19)	57

ческие заболевания и предрасположенности. Кроме того, агент «человек» может обратиться в медучреждение через плановое обращение к участковому врачу или в профилактических целях при диспансеризации, профосмотрах, при выявленном ранее хроническом заболевании, находящимся в состоянии ремиссии. При этом выбор конкретного первичного медицинского учреждения при плановой форме медпомощи, производится на основе разработанного муравьиного алгоритма (Алферьев и др., 2025). В этих случаях агенты типа «человек» могут осуществить взаимодействие с агентами «заболевание» в обратной форме (агент «человек» выбирает агента «заболевание» из доступных на данный момент), после этого происходит аналогичное взаимодействие со сменой состояний агента «человек».

Минимальная модельная единица времени 1 сутки (день), основной модельный период 1 год. При запуске модели агенты «медучреждения» определены исходя из структуры системы регионального здравоохранения, агенты типа «человек» и агенты «заболевания» генерируются исходя из ста-

тистических данных (половозрастной структуры, населенности в городах и округах и пр.), формируются объемы профилактических мероприятий. При смене года агенты типа «человек» в состоянии «умер» утилизируются с сохранением всех параметров в базе данных, генерируются новые агенты типа «человек» с возрастом 0 на основе статистических данных рождаемости или количества беременных женщин в предыдущем году с учетом показателей младенческой смертности при родах. Генерируются новые агенты типа «заболевание». В результате работы модели можно получить необходимые показатели для оценки эффективности системы здравоохранения: ожидаемая продолжительность жизни при рождении, смертность населения старше трудоспособного возраста, смертность населения от болезней системы кровообращения и одногодичная летальность больных со злокачественными новообразованиями (Нацун, 2025). Калибровку предложенного прототипа модели можно осуществлять на основе различных статистических данных путем изменения отдельных параметров системы. Разработанный прототип агент-ориентированной модели системы регионального здравоохранения Вологодской области требует значительных вычислительных ресурсов для выполнения модели при ее масштабировании до уровня Вологодской области, поэтому изначальный вариант создания прототипа модели в среде разработки агент-ориентированных моделей GAMA Platform оказался нежизнеспособным без проведения дополнительных оптимизационных решений. Далее рассмотрим вопросы компьютерной реализации прототипа агент-ориентированной модели системы регионального здравоохранения Вологодской области и предлагаемые решения по оптимизации модели.

Разработана компьютерная реализация агент-ориентированной модели системы регионального здравоохранения.

Разработка компьютерной реализация прототипа агент-ориентированной модели системы регионального здравоохранения Вологодской области представляет высокую

сложность, с одной стороны, связанную со значительными вычислительными ресурсами для обеспечения работы огромного количества агентов (1 125 612 агентов «человек», 1 746 медицинских сервисов в 72 медицинских учреждениях, 172 985 агентов «заболеваний») и достаточно сложных алгоритмов взаимодействия между ними, с другой стороны, ограничениями систем проектирования и разработки агент-ориентированных моделей. Для оптимизации вычислительных ресурсов и обеспечения необходимой гибкости при масштабировании системы была выполнена разработка архитектуры модели, которая представляет собой совокупность двух структур: ядра и интерфейса управления. Таким образом, упрощается расширение и модификация интерфейса управления, с одной стороны, и масштабирование ядра модели – с другой. Ядро модели выполнено с использованием ряда технологий, применяющихся на сегодняшний день в разработке высоконагруженных серверных приложений, что обеспечивает широкие возможности расширения сценариев выполнения модели, а также ее масштабирования. Для описания логики выполнения был использован язык программирования go (golang), сочетающий простоту синтаксиса, широкую поддержку параллелизма и асинхронности на уровне базовых конструкций языка, а также быстродействие благодаря компиляции в исполняемый двоичный формат. Помимо характеристик самого языка, важно отметить, что go предоставляет сразу целый ряд инструментов, упрощающих разработку: анализатор кода, форматировщик кода, компилятор, а также библиотеку готовых для использования пакетов.

Любая экспериментальная модель требует сбора различной информации во время выполнения: как технической – для отладки и оптимизации выполнения, так и информации о выполнении и состоянии агентов, сервисов и т. п. Информацию, собираемую во время выполнения программы, чаще всего называют метриками. Сбор метрик необходимо организовывать таким образом, чтобы данный процесс не оказывал значительного

влияния на производительность и, что более важно, на саму логику выполнения модели. Для промышленных информационных систем существует ряд специальных готовых профессиональных инструментов такого рода мониторинга. Они уже оптимизированы для быстрого сбора, хранения и запроса данных о выполнении. Для разработанной модели была выбрана система мониторинга и оповещения *prometheus*. Данный инструмент широко распространен у разработчиков серверных приложений, а также обладает необходимым и достаточным функционалом. В дополнение к системе сбора метрик вполне удачным решением стало использование сервиса отображения метрических данных *grafana dashboards*. Данный сервис имеет удобный интерфейс интеграции с *prometheus*, а также широкий арсенал способов отображения и комбинирования данных. *Grafana* также широко распространена в разработке серверных приложений и является индустриальным стандартом. Часть данных, необходимых для работы модели, хранится в виде записей в реляционной базе данных. В качестве СУБД для данной модели была выбрана *MySQL* из-за доступности и хороших показателей производительности (среди прочих широко распространенных СУБД). Описанный набор технологий хотя и позволяет в модели достаточно просто реализовать множество необходимых функций, достаточно сложен в настройке. Таким образом, при разворачивании модели на новой вычислительной системе требуется каждый раз устанавливать и конфигурировать каждый из компонентов отдельно, что может привести к ошибкам выполнения, а также затруднить дальнейшую работу с моделью. Чтобы предотвратить данную ситуацию, был использован инструментарий контейнеризации *Docker*. *Docker* представляет целый набор инструментов и сервисов, позволяющих в автоматическом режиме конфигурировать и запускать программное обеспечение в изолированных виртуальных контейнерах. В случае разрабатываемой модели были использованы готовые образы для *mysql*, *grafana* и *prometheus*. Само

golang-приложение было развернуто на базе контейнера ОС *Alpine linux*. При помощи *docker-compose* осуществлена настройка всех компонентов ядра модели, что позволило свести запуск ядра к вводу одной команды в терминале ОС. Интерфейс управления представляет собой программу на базе среды разработки агент-ориентированных моделей *GAMA Platform*. Данная среда предоставляет множество инструментов для настройки отображения управляющих элементов, для создания конфигураций агентов, также в ее интерфейс встроены элементы управления ходом выполнения модели (шкала скорости, отображение количества выполненных шагов моделирования). *GAMA Platform* взаимодействует с *http*-интерфейсом ядра для интеграции создания агентов и запуска очередного шага посредством отправки ядру соответствующих запросов (*рис. 4*).

Под программной частью ядра подразумевается программа, написанная на языке программирования *go*, которая и задает логику выполнения агентов и модели. Выбранный язык программирования частично определяет структуру проекта таким образом, что программа делится на различные пакеты. В рамках разработанной модели каждый из пакетов отвечает за определенную функцию. Центральной составляющей модели является пакет *model*. Внутри него располагается код модели в смысле каркаса, на базе которого происходит выполнение агентов и сервисов. Модель способна регистрировать агентов, при этом сама по себе она работает не с конкретным типом агентов, а с абстрактным – с любыми классами, реализующими интерфейс *Agent*. Агентом в таком случае будет считаться любая сущность, у которой можно вызывать функцию *Step*, передав в качестве аргумента контекст выполнения и информацию о текущем шаге выполнения. Такой подход позволяет реализовывать различных агентов без необходимости изменять общую логику выполнения. Помимо агентов, модель работает с сервисами. Различие агентов и сервисов заключается в том, что действия агента ограничиваются очередным шагом, в то время как сервис запускается при

Схема компьютерной реализации агент-ориентированной модели

Интерфейс управления



Рис. 4. Схема компьютерной реализации агент-ориентированной модели

Источник: составлено авторами.

старте модели и непрерывно выполняет одну функцию все время работы. Сервисы модель воспринимает также абстрактно, позволяя выполнять различные классы, соответствующие общему интерфейсу. Каждый сервис и каждый очередной шаг агента выполняются в собственной goroutine – облегченной версии системных потоков. Таким образом, в некоторых случаях достигается реальный параллелизм за счет возможности программы выполняться параллельно на нескольких ядрах процессора. Медицинские сервисы в рамках модели – поставщики медицинских услуг. Каждый сервис обладает собственным расписанием, пропускной способностью и

обслуживаемым им классом заболевания. Данные параметры задаются при начальной конфигурации модели – в коде, но существует возможность вынести данную настройку в http интерфейс модели, чтобы иметь возможность управлять созданием медицинских сервисов через GAMA Platform. Каждый сервис владеет каналом агентов типа «человек», по которому и происходит обращение пациента к данному сервису. Устройство каналов в golang позволяет моделировать в том числе пропускную способность медицинских сервисов за счет организации буферизованных каналов, к тому же таким образом получается достаточно простой и надежный

способ коммуникации агентов и сервисов, выполняющихся в параллельных горутинах. Медучреждение не является ни сервисом, ни агентом – оно представляет собой прослойку между агентами и медицинскими сервисами, чтобы упростить способ их взаимодействия. С одной стороны, при создании каждого агента пациента ему передается объект поликлиники (clinic), к которому он обращается при необходимости посетить медицинское учреждение. С другой – поликлиника хранит информацию о доступных очередях пациентов и передает эту информацию медицинским сервисам согласно обслуживаемым ими классам заболеваний. Часть пакетов не реализуют непосредственно логику выполнения агентов и моделирования, но служат интеграции с другими сторонними сервисами, такими как метрики или база данных. Так, имеется пакет control, в рамках которого описаны обработчики управляющих http запросов к модели. А пакет storage отвечает за взаимодействие с базой данных – он генерирован автоматически на основе SQL-кода с использованием инструмента sqlc.

Заключение

Таким образом, исследование направлено на создание и реализацию агент-ориентированной модели региональной системы здравоохранения Вологодской области. Основной его целью стало построение комплексной модели, интегрировавшей пространственно-географические параметры расположения инфраструктурных объектов здравоохранения и поведенческие характеристики населения региона. Благодаря этому решению стала возможной разработка эффективных организационных и управлеченческих мероприятий, учитывающих региональную специфику, улучшающих доступность медицинской помощи и повышающих качественные показатели функционирования системы здравоохранения. Исследование базировалось на применении методов имитационного моделирования, зарекомендовавших себя как эффективный инструмент анализа динамических процессов в социально-экономических системах.

Был сделан акцент на агент-ориентированном подходе, который позволил создать реалистичную модель территориального размещения объектов социальной инфраструктуры и оптимизировать логистические потоки населения в региональном пространстве. Преимущества данного метода заключаются в универсальности, адаптивности и возможности применения в разных сферах государственного управления, включая городское планирование, образование и здравоохранение. Особое значение уделяется применению агент-ориентированного моделирования именно в сфере здравоохранения ввиду его способности учитывать индивидуальные реакции и предпочтения участников системы, влияющие на здоровье населения. Подобный подход помогает выявлять причины возникновения отрицательных тенденций в показателях здоровья и предвидеть возможные последствия планируемых реформ и изменений.

Разработка прототипа модели велась поэтапно. Первоначально была создана концептуальная схема, включавшая модули первичной и специализированной медицинской помощи, экстренной медицины и специализированные подразделения. Затем проведены детализация и калибровка модели, основанные на структуре муниципального устройства региона и особенностях предоставления медицинских услуг. Было выделено три основных типа агентов («человек», «медицинское учреждение», «заболевание»), взаимодействие которых имитирует реальные процессы функционирования системы здравоохранения. Модель позволила учесть географические различия регионов Вологодской области, численность и плотность населения, распределение медицинских учреждений и логистические маршруты пациентов. Особое внимание уделялось факторам риска, связанным с заболеваниями сердечно-сосудистой системы, болезнями органов дыхания, опорно-двигательного аппарата и онкологическими патологиями, существенно влияющим на общее состояние здоровья населения.

Полученная модель предоставляет возможность апробировать потенциальные управленические решения в виртуальной среде, оценивать их последствия и прогнозировать эффекты запланированных изменений. Она предназначена для поддержки принятия стратегических решений органами власти и управления, помогая своевременно реагировать на возникающие проблемы и эффективно перераспределять ресурсы. Итоговые расчеты и сценарии, полученные с помощью модели, способствуют оптимизации процесса планирования и модернизации инфраструктуры здравоохранения региона. Кроме того, внедрение компьютерной реализации модели значительно повышает удобство эксплуатации и увеличивает гибкость системы. Использованные технологические решения обеспечивают устойчивость и надежность модели, а также дают возможность легко добавлять новые функции и модули в будущем. Автоматизация процессов управления, мониторинг и обработка большого объема данных позволяют повысить точность прогнозов и обоснованность принимаемых решений.

Несмотря на достигнутые успехи, остается пространство для дальнейших исследований и усовершенствований модели. Среди ключевых направлений отметим следующие: 1) повышение точности и надежности прогнозируемых показателей путем расширения базы исходных данных и совершенствования методик обработки информации; 2) интеграция большего числа переменных, характеризующих социальную и экономическую среду региона, таких как уровень доходов населения, экологические факторы и

доступность транспортных коммуникаций; 3) углубление анализа поведенческих аспектов населения, особенно касающихся мотивации к обращению за медицинской помощью и выбора путей профилактики заболеваний; 4) совершенствование программного обеспечения и технических возможностей для увеличения масштабируемости и повышения устойчивости модели к значительным нагрузкам.

Эти направления позволят сделать модель еще более точной и актуальной для практических нужд управления здравоохранением региона.

Агент-ориентированная модель системы здравоохранения Вологодской области доказала свою эффективность и полезность для практики управления регионом. Полученные результаты подтверждают важность комплексного подхода к оценке ситуации в здравоохранении, учитывая разнобразие факторов, влияющих на здоровье населения и функционирование медицинских учреждений. Проведение подобного моделирования открывает перспективы для внедрения аналогичных подходов в других регионах России, способствуя повышению качества медицинских услуг и снижению рисков ухудшения здоровья населения. Следовательно, предлагаемая модель является важным вкладом в развитие теории и практики регионального управления здравоохранением, открывая новые горизонты для эффективного использования современных технологий и научных достижений в интересах сохранения и укрепления здоровья жителей Вологодской области и страны в целом.

ЛИТЕРАТУРА

- Алферьев Д.А., Нацун Л.Н., Ригин В.А., Дианов Д.С. (2025). Ройный интеллект в моделировании социально-экономических процессов // Информационное общество. № 3. С. 136–151.
- Бахтизин А.Р. (2008). Агент-ориентированные модели экономики. Москва: Экономика. 279 с.
- Дианов С.В., Калашников К.Н., Ригин В.А. (2022). Агент-ориентированное моделирование регионального здравоохранения: решение задачи формализации медицинской активности жителей // Экономические и социальные перемены: факты, тенденции, прогноз. Т. 15. № 1. С. 55–73. DOI: 10.15838/esc.2022.1.79.3
- Дианов С.В., Швецов А.Н., Дианов Д.С. (2024). Разработка контекстной диаграммы агент-ориентированной пространственно-распределенной системы // Вестник Череповецкого государственного университета. № 1 (118). С. 26–36. DOI: 10.23859/1994-0637-2024-1-118-1

- Макаров В.Л. (2013). Социальное моделирование набирает обороты // Экономика и математические методы. № 49 (4). С. 5–17.
- Макаров В.Л., Бахтизин А.Р. (2013). Применение суперкомпьютерных технологий в общественных науках // Экономика и математические методы. № 49 (4). С. 18–32.
- Макаров В.Л., Бахтизин А.Р., Сушко Е.Д. (2016). Агент-ориентированные модели как инструмент апробации управленческих решений // Управленческое консультирование. № 12. С. 16–25.
- Макаров В.Л., Бахтизин А.Р., Сушко Е.Д., Сушко Г.Б. (2018). Supercomputer simulation of social processes: new technologies // Herald of the Russian Academy of Sciences, 88(3), 200–209. DOI: 10.1134/S1019331618030139
- Макаров В.Л., Бахтизин А.Р., Сушко Е.Д., Сушко Г.Б. (2019). Агент-ориентированная суперкомпьютерная демографическая модель России: анализ апробации // Экономические и социальные перемены: факты, тенденции, прогноз. Т. 12. № 6. С. 74–90. DOI: 10.15838/esc.2019.6.66.4
- Нацун Л.Н. (2025). Обоснование выбора показателей эффективности регионального здравоохранения // Экономические и социальные перемены: факты, тенденции, прогноз. Т. 18. № 4. С. 184–198. DOI: 10.15838/esc.2025.4.100.10
- Нацун Л.Н., Алферьев Д.А., Ригин В.А., Дианов Д.С. (2024). Концептуальная схема агент-ориентированной модели регионального здравоохранения // Социальное пространство. Т. 10. № 4. DOI: 10.15838/sa.2024.4.44.1
- Окрепилов В.В., Макаров В.Л., Бахтизин А.Р., Кузьмина С.Н. (2015). Применение суперкомпьютерных технологий для моделирования социально-экономических систем // Экономика региона. № 2 (42). С. 301–313. DOI: 10.17059/2015-2-24
- Швецов А.Н., Дианов С.В., Дианов Д.С. [и др.] (2023). Сервис-ориентированный подход к проектированию агент-ориентированных моделей оптимального пространственного размещения объектов инфраструктуры здравоохранения // Вестник Череповецкого государственного университета. № 1 (112). С. 79–99. DOI: 10.23859/1994-0637-2023-1-112-6
- Badham J., Chattoe-Brown E., Gilbert N. et al. (2018). Developing agent-based models of complex health behavior. *Health & Place*, 54, 170–177. DOI: 10.1016/j.healthplace.2018.08.022
- Dawid H., Neugart M. (2011). Agent-based models for economic policy design. *Eastern Economic Journal*, 37, 44–50.
- Edmonds B. (2010). Bootstrapping knowledge about social phenomena using simulation models. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 13(1). DOI: 10.18564/jasss.1523
- Gaffard J.-L., Napoletano M. (2012). *Agent-Based Models and Economic*. Paris: OFCE.
- Makarov V.L., Bakhtizin A.R., Sushko E.D., Sushko G.B. (2018). Supercomputer simulation of social processes: new technologies. *Herald of the Russian Academy of Sciences*, 88(3), 200–209. DOI: 10.1134/S1019331618030139
- Mendritzki S. (2010). *Artificial Policy: Examining the Use of Agent-Based Modeling in Policy Contexts. Magisterarbeit*. Calgary: University of Calgary.
- Okrepilov V.V., Makarov V.L., Bakhtizin A.R., Kuzmina S.N. (2015). Application of supercomputer technologies for simulation of socio-economic systems. *R-Economy*, 1(2), 340–350. DOI: 10.15826/recon.2015.2.016
- Pyka A., Werker C. (2009). The methodology of simulation models: chances and risks. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 12(4).
- Silverman B.G. (2014). Systems approach to healthcare: Agent-based modeling, community mental health, and population well-being. *Artificial Intelligence in Medicine*, 63(2). DOI: 10.1016/j.artmed.2014.08.006
- Tracy M., Cerdá M., Keyes K.M. (2018). Agent-based modeling in public health: Current applications and future directions. *Annual Review of Public Health*, 39, 77–94. DOI: 10.1146/annurev-publhealth-040617-014317

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Василий Александрович Ригин – заведующий лабораторией, Вологодский научный центр Российской академии наук (Российская Федерация, 160014, г. Вологда, ул. Горького, д. 56а; e-mail: var@vsc.ac.ru)

Даниил Сергеевич Дианов – инженер, Вологодский научный центр Российской академии наук (Российская Федерация, 160014, г. Вологда, ул. Горького, д. 56а; e-mail: daniil.dianov@gmail.com)

Rigin V.A., Dianov D.S.

FEATURES OF THE PROTOTYPE DEVELOPMENT OF AN AGENT-BASED MODEL OF THE REGIONAL HEALTHCARE SYSTEM USING THE CASE STUDY OF THE VOLOGDA REGION

The presented research is devoted to the creation of a prototype of an agent-based model of the Vologda Region regional healthcare system. The aim of our study is to integrate the spatial and geographical parameters of the healthcare infrastructure and the behavioral characteristics of the region's population. The developed model includes functional modules of primary and specialized medical care, emergency care and specialized centers, which allows for a detailed study of the processes of interaction between patients and the healthcare system. The methodological basis of the research is the concept of simulation modeling, widely used for the analysis of complex socio-economic systems. The simulated scenarios allow for conducting virtual experiments, assessing the impact of management decisions, and offering recommendations for improving the quality of medical services provided. The practical application of the model provides for determining the optimal resource allocation strategy and organizing an effective network of medical institutions. The simulation results help to identify problem areas, assess the availability of medical care, and propose measures to improve the quality of public services. Thus, the presented work is aimed at improving the efficiency of the regional health system and the formation of a set of measures focused on specific regional needs and characteristics of the population. This contributes to the adoption of scientifically sound management decisions aimed at achieving the goals of sustainable development of the region in the field of public health.

Agent-based modeling, regional healthcare system.

REFERENCES

- Alfer'ev D.A., Natsun L.N., Rigin V.A., Dianov D.S. (2025). Swarm intelligence in modeling socio-economic processes. *Informatsionnoe obshchestvo*, 3, 136–151 (in Russian).
- Badham J., Chattoe-Brown E., Gilbert N. et al. (2018). Developing agent-based models of complex health behavior. *Health & Place*, 54, 170–177. DOI: 10.1016/j.healthplace.2018.08.022
- Bakhtizin A.R. (2008). *Agent-orientirovannye modeli ekonomiki* [Agent-Based Models of Economics]. Moscow: Ekonomika.
- Dawid H., Neugart M. (2011). Agent-based models for economic policy design. *Eastern Economic Journal*, 37, 44–50.
- Dianov S.V., Kalashnikov K.N., Rigin V.A. (2022). Agent-based modeling of regional healthcare: Addressing the task of formalizing residents' medical activity. *Ekonomicheskie i sotsial'nye peremeny: fakty, tendentsii, prognoz=Economic and Social Changes: Facts, Trends, Forecast*, 15(1), 55–73. DOI: 10.15838/esc.2022.1.79.3 (in Russian).
- Dianov S.V., Shvetsov A.N., Dianov D.S. (2024). Development of contextual diagram of an agent-oriented spatially distributed system. *Vestnik Cherepovetskogo gosudarstvennogo universiteta*, 1(118), 26–36. DOI: 10.23859/1994-0637-2024-1-118-1 (in Russian).
- Edmonds B. (2010). Bootstrapping knowledge about social phenomena using simulation models. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 13(1). DOI: 10.18564/jasss.1523
- Gaffard J.-L., Napoletano M. (2012). *Agent-Based Models and Economic*. Paris: OFCE.
- Makarov V.L. (2013). Social modeling is gaining momentum. *Ekonomika i matematicheskie metody*, 49(4), 5–17 (in Russian).
- Makarov V.L., Bakhtizin A.R. (2013). Application of supercomputing technologies in social sciences, *Ekonomika i matematicheskie metody*, 49(4), 18–32 (in Russian).

- Makarov V.L., Bakhtizin A.R., Sushko E.D. (2016). Agent-based models as a tool for testing management decisions. *Upravlencheskoe konsul'tirovanie*, 12, 16–25 (in Russian).
- Makarov V.L., Bakhtizin A.R., Sushko E.D., Sushko G.B. (2018). Supercomputer simulation of social processes: New technologies. *Herald of the Russian Academy of Sciences*, 88(3), 200–209. DOI: 10.1134/S1019331618030139 (in Russian).
- Makarov V.L., Bakhtizin A.R., Sushko E.D., Sushko G.B. (2018). Supercomputer simulation of social processes: New technologies. *Herald of the Russian Academy of Sciences*, 88(3), 200–209. DOI: 10.1134/S1019331618030139
- Makarov V.L., Bakhtizin A.R., Sushko E.D., Sushko G.B. (2019). Agent-based supercomputer demographic model of Russia: Approbation analysis. *Ekonomicheskie i sotsial'nye peremeny: fakty, tendentsii, prognoz=Economic and Social Changes: Facts, Trends, Forecast*, 12(6), 74–90. DOI: 10.15838/esc.2019.6.66.4 (in Russian).
- Mendritzki S. (2010). *Artificial Policy: Examining the Use of Agent-Based Modeling in Policy Contexts. Magisterarbeit*. Calgary: University of Calgary.
- Natsun L.N. (2025). Substantiating the choice of regional healthcare effectiveness indicators. *Ekonomicheskie i sotsial'nye peremeny: fakty, tendentsii, prognoz=Economic and Social Changes: Facts, Trends, Forecast*, 18(4), 184–198. DOI: 10.15838/esc.2025.4.100.10 (in Russian).
- Natsun L.N., Alfer'ev D.A., Rigin V.A., Dianov D.S. (2024). Conceptual scheme of an agent-based model of regional health care. *Sotsial'noe prostranstvo=Social Area*, 10(4). DOI: 10.15838/sa.2024.4.44.1 (in Russian).
- Okrepilov V.V., Makarov V.L., Bakhtizin A.R., Kuz'mina S.N. (2015). Application of supercomputer technologies for modeling socio-economic systems. *Ekonomika regiona*, 2(42), 301–313. DOI: 10.17059/2015-2-24 (in Russian).
- Okrepilov V.V., Makarov V.L., Bakhtizin A.R., Kuz'mina S.N. (2015). Application of supercomputer technologies for simulation of socio-economic systems. *R-Economy*, 1(2), 340–350. DOI: 10.15826/recon.2015.2.016
- Pyka A., Werker C. (2009). The methodology of simulation models: Chances and risks. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 12(4).
- Shvetsov A.N., Dianov S.V., Dianov D.S. et al. (2023). Service-oriented approach to designing agent-based models for optimal spatial placement of healthcare infrastructure facilities. *Vestnik Cherepovetskogo gosudarstvennogo universiteta*, 1(112), 79–99. DOI: 10.23859/1994-0637-2023-1-112-6 (in Russian).
- Silverman B.G. (2014). Systems approach to healthcare: Agent-based modeling, community mental health, and population well-being. *Artificial Intelligence in Medicine*, 63(2). DOI: 10.1016/j.artmed.2014.08.006
- Tracy M., Cerdá M., Keyes K.M. (2018). Agent-based modeling in public health: Current applications and future directions. *Annual Review of Public Health*, 39, 77–94. DOI: 10.1146/annurev-publhealth-040617-014317

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Vasilii A. Rigin – Head of Laboratory, Vologda Research Center, Russian Academy of Sciences (56A Gorky Street, Vologda, 160014, Russian Federation; e-mail: var@vsc.ac.ru)

Daniil S. Dianov – Engineer, Vologda Research Center of the Russian Academy of Sciences (56A Gorky Street, Vologda, 160014, Russian Federation; e-mail: daniil.dianov@gmail.com)