

НАУЧНЫЕ ОБЗОРЫ

DOI: 10.15838/ptd.2021.2.112.7

УДК 330.4:338.26 | ББК 65.495+65.054+51.1

© Дианов С.В., Калашников К.Н., Ригин В.А.

ПОИСК ПУТЕЙ ОПТИМАЛЬНОГО ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАЗМЕЩЕНИЯ ОБЪЕКТОВ ИНФРАСТРУКТУРЫ ЗДРАВООХРАНЕНИЯ: ОБЗОР МЕТОДИЧЕСКОГО ИНСТРУМЕНТАРИЯ¹



СЕРГЕЙ ВЛАДИМИРОВИЧ ДИАНОВ

Вологодский научный центр Российской академии наук

г. Вологда, Российская Федерация

e-mail: dianov.sv@mail.ru

ORCID: [0000-0001-8297-8077](#); ResearcherID: [P-9737-2017](#)



КОНСТАНТИН НИКОЛАЕВИЧ КАЛАШНИКОВ

Вологодский научный центр Российской академии наук

г. Вологда, Российская Федерация

e-mail: konstantino-84@mail.ru

ORCID: [0000-0001-9558-3584](#); ResearcherID: [I-9519-2016](#)



ВАСИЛИЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ РИГИН

Вологодский научный центр Российской академии наук

г. Вологда, Российская Федерация

e-mail: riginva@mail.ru

ORCID: [0000-0001-6359-1192](#)

Для цитирования: Дианов С.В., Калашников К.Н., Ригин В.А. Поиск путей оптимального пространственного размещения объектов инфраструктуры здравоохранения: обзор методического инструментария // Проблемы развития территории. 2021. Т. 25. № 2. С. 108–127. DOI: 10.15838/ptd.2021.2.112.7

For citation: Dianov S.V., Kalashnikov K.N., Rigin V.A. Search for ways of optimal spatial placement of healthcare infrastructure facilities: a review of methodological tools. *Problems of Territory's Development*, 2021, vol. 25, no. 2, pp. 108–127. DOI: 10.15838/ptd.2021.2.112.7

¹ Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ (научный проект № 20-010-00852 А).

В статье рассмотрен актуальный для современной России вопрос территориального управления – поиск путей и инструментов оптимизации пространственного размещения сетей здравоохранения, отвечающих требованиям доступности для населения медицинских служб и экономической целесообразности. Основной целью работы стало обзорное исследование существующих подходов к оптимизации пространственного размещения объектов с точки зрения возможностей их использования применительно к решению более частной и прикладной проблемы – размещения объектов инфраструктуры здравоохранения в Российской Федерации. Основными задачами для ее достижения являлись следующие: постановка задачи оптимизации пространственного размещения объектов инфраструктуры здравоохранения; определение существующих методов оптимизации, подходящих для решения обозначенных проблем; анализ возможностей их использования и формирование предложений по применению наиболее перспективных из них в практике государственных и муниципальных органов власти РФ. Исследование осуществлялось с помощью общенаучных методов формализации, абстрагирования, обобщения, системного анализа. Основными результатами работы стали формализация задачи пространственного размещения объектов инфраструктуры здравоохранения; выявление критериев, с которыми должен соотноситься метод поиска оптимального размещения объектов инфраструктуры здравоохранения, анализ наиболее распространенных в практике методов пространственной оптимизации; обоснование перспективности агент-ориентированного моделирования для решения задачи пространственного размещения объектов инфраструктуры здравоохранения. Научная новизна полученных результатов заключается в сравнительном анализе подходов к инструментальному поиску оптимального территориального/пространственного размещения объектов социальной инфраструктуры, в частности объектов здравоохранения, сопоставлению их сильных и слабых сторон и целесообразности применения для решения практических задач. Их использование при проведении анализа наиболее распространенных в практике методов пространственной оптимизации позволяет говорить о перспективности агент-ориентированного моделирования для решения обозначенной задачи. В связи с этим в качестве направлений дальнейших исследований авторы определяют разработку методологической базы по созданию агент-ориентированных оптимизационных моделей.

Объекты инфраструктуры здравоохранения, методы пространственной оптимизации, геоинформатика, имитационное моделирование.

Введение

Одной из традиционных острых проблем России была и остается сложность формирования и поддержания социальной инфраструктуры, которая удовлетворяла бы двум важнейшим критериям – доступность для населения и экономическая целесообразность. Нередко учесть оба затруднительно, поскольку эти задачи противоположны друг другу. В таких условиях самым разумным решением является поиск наиболее приемлемого варианта, опирающегося на баланс распределения сетей по территории в профиле «централизация – децентрализация». В Конституции Российской Федерации закреплены государственные гарантии на пре-

доставление медицинской помощи гражданам страны. Их обеспечение в соответствии с утвержденной Указом Президента РФ от 6 июня 2019 года № 254 Стратегией развития здравоохранения в Российской Федерации на период до 2025 года связано с созданием условий для повышения доступности и качества медицинской помощи. Основным критерием оценки данного процесса выступает степень удовлетворения потребностей населения. Главным препятствием для адекватного ответа российского здравоохранения на ожидания граждан в настоящее время является недостаточность ресурсного обеспечения в сочетании с неэффективностью его использования². В условиях обострившихся

² Здравоохранение: необходимые ответы на вызовы времени: совместн. докл. Центра стратегических разработок и Высшей школы экономики от 21.02.2018 / С.В. Шишкин [и др.]. М.: Центр стратегических разработок, 2018. 56 с.

социально-экономических проблем, сокращения налоговой и производственной базы возможности финансирования социальной сферы могут снижаться. Отсюда берут начало сложнейшие проблемы его распределения.

К началу третьего тысячелетия во многих развитых странах мира стала использоваться оценка методов диагностики и лечения не только с точки зрения доказательной медицины, но и с позиции адекватного расходования ресурсов на их внедрение, то есть по экономическим результатам. При этом они рассматриваются в виде совокупности следующих составляющих³: технической (определение минимума ресурсов, необходимых для достижения определенного результата); продуктивной (выбор наилучшего варианта из альтернативных ресурсов); распределительной (оптимальное распределение ресурсов).

Эффективное решение общей задачи по распределению ресурсов связано с необходимостью учета всех трех составляющих. Исходными данными являются установленные приоритеты развития системы здравоохранения, имеющиеся для реализации ресурсы, существующая инфраструктура, территориальное распределение населения, его количественная и качественная характеристики. При этом необходимо принимать во внимание некоторые условия:

- существующие территориальные особенности;
- динамику происходящих демографических, экономических и технологических изменений;
- аспекты социального поведения по отношению к предоставлению медицинских услуг как на уровне отдельной личности, так и на уровне групп;
- многоаспектность и связанность медицинских услуг.

Для эффективного решения обозначенной проблемы должны использоваться научно обоснованные подходы. Соответственно, их разработка является актуальной задачей. На сегодняшний день в мире имеется существенный и важный опыт методологической

проработки и практической реализации агент-ориентированного моделирования как в практике государственного управления в целом, так и в здравоохранении. Однако все еще недостаточно внимания уделяется аспектам пространственного размещения объектов инфраструктуры здравоохранения, которые редко опираются на собственно потребности населения и поведенческие установки различных половозрастных и социальных групп. Это планируется учесть при разработке проекта. Иными словами, разрабатываемые сценарии пространственного размещения объектов инфраструктуры здравоохранения будут опираться на объективные императивы поведения жителей территорий (будут сформулированы по результатам полевых исследований) в их взаимодействии с медицинскими службами, миграционные установки, а также комплекс внутренних факторов, среди которых половозрастные особенности, уровень образования и благосостояния, а также место проживания. Наконец, сама институциональная среда современного российского здравоохранения, представляющая собой конгломерат механизмов управления и финансирования, доставшихся «в наследство» от системы Семашко, а также сформированных в течение почти трех десятилетий социальных реформ, является уникальным объектом для формализации и изучения, в том числе с использованием инструментария агент-ориентированного моделирования.

Цель нашей работы состоит в обзорном исследовании существующих подходов к оптимизации пространственного размещения объектов с точки зрения возможностей их использования применительно к решению проблемы размещения объектов инфраструктуры здравоохранения в Российской Федерации. Основными задачами для обеспечения оптимизации пространственного размещения объектов инфраструктуры здравоохранения стали определение существующих методов оптимизации, подходящих для решения обозначенных проблем,

³ Данилова Н.В. Материально-технические ресурсы здравоохранения: учебн. пособие / под ред. В.И. Стародубова. М.: Изд. дом Академии естествознания, 2019. 60 с.

анализ возможностей их использования и формирование предложений по применению наиболее перспективных из них в практике государственных и муниципальных органов власти РФ.

Научная новизна полученных результатов заключается в разработке механизма интерпретации методов оптимального пространственного размещения объектов, в частности объектов здравоохранения.

Актуальные проблемы территориального развития

Территориальная дифференциация – одна из наиболее актуальных проблем современной России, однако для разработки мероприятий по ее нивелированию необходимо адекватное понимание источников, масштабов и факторов неравенства. С одной стороны, центр-периферийная теория Дж. Фридмана и сложившаяся во второй половине XX века тенденция пространственной концентрации производительных сил позволяют определить централизацию экономики как данность, объективное условие развития страны и ее регионов [1]. С другой стороны, нельзя отрицать необходимость соблюдения разумной пропорции между тенденциями централизации и децентрализации территориального развития.

Оптимальная модель пространственного размещения и функционирования объектов экономической системы должна учитывать требования как экономической эффективности, так и социальной справедливости. Особую роль здесь играют современные институты (административные, финансовые), которые позволяют преодолевать сложившиеся объективные барьеры развития территорий, успешно реализовывать их относительные и абсолютные конкурентные преимущества [2]. В современной России политика преодоления пространственного неравенства реализуется фрагментарно и с перекосами. Так, снижение дефицита налогооблагаемой базы (напомним, большинство субъектов РФ, а именно 72 единицы, –

дотационные) происходит за счет бюджетных дотаций узкой группе регионов, выбор которых опирается, по большей части, на политические основания, чем коллективные интересы. В ряде национальных республик, таких как Алтай, Дагестан, Ингушетия, Тыва, Чеченская Республика, а также Камчатском крае доля дотаций из федерального бюджета превышает 40% объема собственных доходов консолидированного бюджета субъекта РФ⁴. Выравнивающий принцип региональной политики создает значительные риски в бюджетной сфере, губит инициативу по мобилизации внутренних ресурсов развития, приводит к обострению национальных противоречий внутри страны.

На сегодняшний день пространственная поляризация в параметрах экономического и, следовательно, социального развития в России обусловлена и региональным профилем экономической деятельности. В условиях, когда значительная часть доходов бюджета формируется за счет нефтегазовой ренты, регионы, специализирующиеся на добыче энергоносителей, оказываются в выигрышном положении (они обладают более широкой налоговой базой, следовательно, аккумулируют большие, чем прочие территории, средства для развития социальной инфраструктуры и человеческого капитала). Разброс в значениях доходов бюджета в расчете на душу населения между субъектами РФ достигает 18 раз. Кроме того, высокие доходы населения и показатели развития социальной сферы отмечаются в крупных агломерациях. Социально-экономическое развитие территорий с меньшим ресурсным потенциалом, особенно сельских районов, напротив, тормозится. Последнее, в свою очередь, приводит к оттоку рабочей силы, негативным сдвигам в половозрастной структуре населения, создавая порочный круг деградации. Формирование разветвленных и доступных для граждан сетей социальной инфраструктуры (образования, здравоохранения, культуры) затрудняется как объективными причинами, среди которых традиционная фор-

⁴ Приказ Минфина России от 15 ноября 2019 г. № 1032 // Гарант.ру. URL: <http://www.garant.ru/news/1304783/#ixzz6HL9OkM4T>

ма расселения, характеризующаяся мелко-селенностью при низкой плотности, система пространственного размещения материальной базы, сложившейся в советский период, так и субъективными, в том числе недостаточным вниманием органов власти к соблюдению требований качества и доступности социальных услуг.

Необходимость преодоления или, по крайней мере, смягчения социальной дифференциации назрела во всех регионах страны, особенно остро она чувствуется по линии «город – село». Одним из доступных государственным органам исполнительной власти инструментов для достижения этой цели является направление трансфертов менее развитым регионам, параллельно – применение методов пространственной оптимизации сетей социальной инфраструктуры, прежде всего важнейшей отрасли общественного сектора – здравоохранения. Это позволит повысить уровень и качество жизни населения в периферийных территориях при соблюдении императивов экономической целесообразности и равенства граждан в правах в доступе к базовым общественным благам и социальным услугам.

Задача пространственного размещения объектов инфраструктуры здравоохранения

Планирование структурных преобразований системы здравоохранения на территории Российской Федерации осуществляется с учетом достигнутого ресурсного и кадрового состояния системы здравоохранения территории, исходя из особенностей половозрастного состава, уровня и структуры заболеваемости, плотности населения, климатических и географических особенностей территории, транспортной доступности медицинских организаций на территории⁵.

В общем виде задачу можно описать как распределение частично мобильных сервисов для мобильных пользователей. Здесь понятие сервиса определяется на уровне

предоставления отдельной медицинской услуги. Понятие пользователя определено на уровне населения, проживающего на территории. Мобильность сервиса обеспечивается возможностью его предоставления путем доставки к месту текущей дислокации пользователя. Мобильность пользователей связана с их способностью перемещаться к местам предоставления сервисов.

На территории может существовать определенное множество точек размещения пользователей (узлы размещения пользователей). Их можно трактовать достаточно широко. Однако с точки зрения планирования размещения объектов инфраструктуры здравоохранения оперируют понятием «постоянное место жительства». В зависимости от масштаба решаемой задачи местом жительства могут быть определены здание, отдельная территориальная единица населенного пункта, населенный пункт и т. п. Медицинские сервисы также могут располагаться в приспособленных для этого точках территории (узлы размещения сервисов). Их определение согласуется с определением узлов размещения пользователей. Масштаб решаемой задачи может влиять на степень агрегации сервисов и пользователей. При этом нужно понимать, что агрегация сервисов и пользователей не обязательно должна влиять на степень агрегации узлов их расположения.

Узлы размещения пользователей и сервисов соединяются путями. Между двумя узлами может быть определено несколько путей доступа к одному и тому же сервису. Пути могут иметь разный тип. Каждый тип определяет свои способы доступа к сервису. Один и тот же путь может иметь разные способы доступа к сервису, содержащие свои значения параметров. В качестве параметров путей доступа к сервису выступают время доступа, стоимость доступа, условия получения доступа.

Пользователи могут находиться в двух состояниях: отсутствие потребностей в медицинских сервисах и наличие потребности

⁵ Дабаган Е.К. Роль частного сектора в реформировании системы здравоохранения: мировой опыт и российская практика: дис. ... канд. экон. наук: 08.00.14 / МГИМО МИД РФ. М., 2019. 167 с.

в медицинских сервисах. Состояние потребности в медицинских сервисах характеризуется появлением у пользователей заболеваний. Данный процесс происходит в течение определенного времени. При этом состояние потребности в медицинских сервисах характеризуется интенсивностью возникновения потребности в отдельных видах сервисов – количестве возникших заболеваний за временной промежуток. Интенсивность можно определить как случайное распределение, параметрами которого могут быть характеристики самих пользователей и характеристики узлов их размещения. Набор таких параметров нельзя однозначно определить ввиду объективных сложностей выявления всевозможных факторов, влияющих на состояние здоровья человека.

Каждое заболевание связано с необходимостью доступа к определенным сервисам. Цепочка предоставляемых сервисов по одному и тому же заболеванию может различаться. Находясь в состоянии потребности в медицинских сервисах, пользователь должен определиться с приемлемым для него способом доступа к ним. Существует два варианта: вызов мобильного сервиса и самостоятельное перемещение к сервису.

Перемещение мобильного сервиса может быть связано либо с вызовом пользователя, либо с реализацией поставленных перед сервисом целей. Во втором случае должен существовать алгоритм формирования маршрута передвижения сервиса.

Любой сервис характеризуется показателями максимального количества одновременно обслуживаемых пользователей и времени обслуживания одного пользователя. Если сервис в данный момент времени обслуживает максимально возможное для него количество пользователей, то он не доступен для остальных пользователей. Сервисы также характеризуются стоимостью. Для различных пользователей стоимость предоставления одного и того же сервиса может отличаться.

Задача оптимального размещения сервисов здравоохранения связана с поиском

вариантов, которые обеспечивают наилучшие характеристики системы с учетом выбранных критериев.

На сегодняшний день не существует однозначно определенных критериев оптимальности. Как правило, они формулируются на уровне государственного управления исходя из принятых приоритетов и существующих возможностей. В большинстве случаев они связаны с временными ограничениями на возможность получения того или иного сервиса либо с количеством сервисов в расчете на определенное количество пользователей. При существовании множества критериев и внешних условий, которые проблематично учесть в полном объеме, сформулированные с их учетом оптимизационные задачи будут иметь различные решения. Таким образом, проблема оптимального пространственного размещения объектов инфраструктуры здравоохранения является задачей многоаспектной и алгоритмически сложной [3].

Условие задач оптимизации формулируется следующим образом: среди элементов x , образующих множество X , найти такой элемент $x(i)$, при котором заданная целевая функция $F(x)$ принимает оптимальное значение $f(x(i))$ с учетом заданного критерия оптимальности. Задача поиска оптимального размещения объектов переменной X , рассматриваемой в процессе решения, служит координатное положение объекта. Целевой функцией $F(x)$ является некоторый показатель оптимальности расположения объекта, определяемый одним или несколькими независимыми критериями. В последнем случае каждый из критериев становится самостоятельной целевой функцией $F_j(x)$, это задача многокритериальной оптимизации. При расчете итоговой целевой функции $F(x)$ учитываются значения всех критериев $F_j(x)$, каждый из них может иметь разную значимость (вес). Целевая функция $F(x)$ может классифицировать всю рассматриваемую территорию по дискретной, или непрерывной, количественной шкале значений пригодности или по качественной шкале на два класса: пригоден/непригоден для расположения объекта.

Для решения различных задач оптимизации в теории принятия решений существует разработанный аппарат математических методов, которые могут быть использованы также и при решении задач поиска оптимального месторасположения объектов. В настоящее время для него в основном применяются методы дискретной оптимизации, геоинформатики и имитационного моделирования. При этом решаются частные задачи по размещению конкретных элементов медицинской инфраструктуры, что во многом снижает адекватность получаемых результатов. Следовательно, на сегодняшний день актуальна задача выбора методов, позволяющих находить комплексные решения. Такие решения должны быть адаптивными по отношению к большинству ситуаций, связанных с размещением ресурсов. В нашем понимании они должны соответствовать задаче пространственного размещения объектов здравоохранения в контексте функционирования частично мобильных сервисов для мобильных пользователей. Именно с этой точки зрения необходимо рассматривать существующие методы на предмет рациональности их использования. Последнее понятие предполагает наличие системы критериев, с которыми должен соотноситься метод поиска оптимального размещения объектов инфраструктуры здравоохранения. Мы определяем следующий их набор: возможность нахождения решения за приемлемое время; возможность учета динамики изменения характеристик исследуемых сущностей во времени; возможность учета динамики пространственного размещения исследуемых сущностей; возможность учета структуры взаимосвязей между исследуемыми сущностями.

Обозначенные критерии не имеют четких количественных оценок. Их использование связано с определением адекватности

методов решаемой задаче (соответствует либо не соответствует) и сравнением методов между собой на субъективном уровне с точки зрения необходимых затрат для получения схожего результата.

Решение задачи размещения объектов инфраструктуры здравоохранения с использованием методов дискретной оптимизации

Задачи размещения объектов составляют широкий класс задач дискретной оптимизации⁶. Возможны различные постановки задач оптимального размещения в зависимости от того, какие ограничения являются существенными и какие критерии оптимальности выбраны⁷. Изучаемую нами проблему можно отнести к классу распределительных задач. Задача размещения может формулироваться как поиск оптимального решения или как поиск субоптимального (близкого к оптимальному) решения. Рассмотрим методы дискретной оптимизации, которые могут быть использованы для ее осуществления.

Полный перебор (метод «грубой силы») является наиболее простым методом решения комбинаторных оптимизационных задач путем непосредственного перебора всех возможных решений задачи. Трудоемкость метода полного перебора прямо зависит от числа комбинаций, поэтому в задачах высокой размерности решение данным методом может выполняться в течение длительного времени.

Метод ветвей и границ заключается в замене полного перебора множества допустимых решений сокращенным за счет удаления из рассмотрения неперспективных (заведомо не являющихся оптимальными) решений. Процесс заканчивается, когда на каждом подмножестве найдено лучшее решение либо не найдено ни одного лучше-

⁶ Лореш М.А. Разработка и исследование алгоритмов муравьиной колонии для решения задач оптимального размещения предприятий: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.13.01 / Омский государственный университет им. Ф.М. Достоевского. Омск, 2006. 20 с.

⁷ Матренин П.В. Разработка адаптивных алгоритмов роевого интеллекта в проектировании и управлении техническими системами: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.13.01 / Национальный исследовательский Томский государственный технический университет. Томск, 2018. 25 с.

го по сравнению с имеющимся⁸. Методом ветвей и границ удобно решать такие задачи целочисленного программирования, в которых число неизвестных невелико либо требования целочисленности относятся не ко всем неизвестным. Время решения задач оптимизации методом ветвей и границ в общем случае экспоненциально возрастает с увеличением размерности задачи, что делает применение метода ограниченным на практике. Кроме того, для каждого класса задач следует реализовывать особые правила ветвления и определения границ, что приводит к сильной зависимости эффективности метода от опыта и умений автора конкретной реализации.

Наиболее простым методом можно считать случайный поиск. Его алгоритм связан с генерацией произвольных случайных решений без какого-либо учета качества ранее проверенных решений с последующим выбором среди них наилучшего [4]. Для большинства задач оптимизации метод произвольной выборки не позволяет получить хорошие результаты, так как такие задачи имеют небольшое количество хороших решений и высокую степень однородности. Принимая во внимание большое число ограничений в задаче размещения, трудно создать на основе метода случайного поиска эффективный алгоритм ее решения, т. к. только для получения варианта размещения, удовлетворяющего системе ограничений задачи, может потребоваться просмотр очень большого числа вариантов.

Чтобы избежать перебора всех вариантов, возможно применение метода «центра тяжести поставок и спроса». При этом декартовы координаты расположения сервисов рассчитываются в соответствии с ожидаемым спросом потребителей и их географическим расположением⁹. Следует принимать во внимание, что рассматривается расстояние от пункта потребления материального

потока до места размещения распределительного центра по прямой, что не позволяет учитывать, например, существующую дорожную сеть. Кроме того, в методе не учитываются возможность выбора количества центров аккумуляции ресурсов и характер спроса потребителей.

Достаточно популярными для решения задач пространственного размещения являются методы линейного программирования [5]. В качестве исходных параметров формируется матрица распределения сервисов, содержащая значения элементов 0 и 1 в зависимости от факта отсутствия/присутствия сервиса в соответствующей точке. Она используется как элемент линейных целевых функций, которые определяют принцип минимальности по различным параметрам (общее расстояние от мест расположения сервисов до всех мест расположения клиентов, общие затраты (временные, финансовые) клиентов на доступ к сервисам и др.). Ограничением служит количество размещаемых сервисов. Для решения задачи могут применяться различные алгоритмы целочисленного линейного программирования. Несмотря на то что некоторые из них (например, симплекс-метод) показывают хорошие результаты при решении прикладных задач, они являются алгоритмами с экспоненциальной сложностью. Причина этого заключается в их комбинаторном характере.

На сегодняшний день при решении многих сложных задач, где математические модели имеют сложную структуру и применение стандартных методов типа ветвей и границ или линейного программирования крайне затруднено, доказали свою конкурентоспособность эволюционные алгоритмы [6]. В их основе лежит аналогия естественного отбора. В рассматриваемом нами случае отбираются решения оптимизационной задачи. Чаще всего применяется генетический

⁸ Нефедов Д.Г. Математические модели и методы решения задач оптимального размещения элементов распределенной производственной структуры: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.13.18 / Южно-Уральский государственный университет. Челябинск, 2015. 16 с.

⁹ Косенко О.В. Разработка методов и алгоритмов решения многоиндексных распределительных задач в условиях неопределенности: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.01 / Южно-Российский государственный политехнический университет им. М.И. Платова. Таганрог, 2017. 172 с.

алгоритм [7]. Стандартный генетический алгоритм начинает свою работу с формирования начальной популяции – конечного набора допустимых решений задачи. В качестве такой популяции рассматривается случайно сгенерированный набор мест размещения сервисов. Задается целевая функция, определяющая эффективность найденного решения. Алгоритм поиска лучшего решения может производиться итерационно, вследствие чего моделируется «эволюционный процесс», продолжающийся определенное число поколений, пока не будет выполнено одно из условий остановки. Достоинством эволюционных алгоритмов является простота применения для различных задач оптимизации, недостатком – невысокая эффективность в решении задач, обладающих большой размерностью и сложной структурой.

Среди эвристических методов в последнее время большую популярность для решения задач оптимального размещения приобретают алгоритмы роевого интеллекта, к которым относят, в частности, муравьиный алгоритм¹⁰. Они основаны на моделях коллективного поведения в природе. Данные алгоритмы показали высокую эффективность при решении комбинаторных задач. Основная сложность при их использовании заключается в необходимости предварительной настройки и доработки под разные виды оптимизационных задач. Кроме того, для разных задач оптимизации лучше подходят различные роевые алгоритмы, но методик их выбора не существует. По данным причинам они недостаточно широко применяются на практике.

Имеется несколько классов дискретных задач размещения объектов¹¹. Первый класс

связан с размещением объектов с неограниченными мощностями, в которых из заданного множества возможных локаций требуется предложить удовлетворяющие требования потребителей при условии минимизации используемых ресурсов. Затраты складываются из стоимости на открытие организаций и затрат на обслуживание клиентов. Другой класс задач представляют задачи размещения с ограничениями на мощности. В таких задачах предполагается, что каждая организация может предоставлять сервисы только в ограниченном количестве. Также можно выделить класс задач размещения объектов с предпочтением клиентов¹². Проведенное исследование дискретных задач размещения показало, что в настоящее время существуют различные подходы к решениям на основе численных методов и это направление активно развивается, однако анализ конкретных примеров подтверждает их высокую вычислительную сложность¹³.

Большая часть практических работ по использованию методов дискретной оптимизации основана на применении детерминированных методов. Однако высокая вычислительная сложность, неопределенность и сложные топологии пространств поиска решений ограничивают его. Ограничения связаны как с недостаточной эффективностью или скоростью работы, так и с высокой трудоемкостью применения методов. Во многих областях для получения близкого к оптимальному решения за время, допустимое для функционирования системы, успешно используются такие методы оптимизации, как эволюционные и роевые алгоритмы. При этом следует учитывать стохастическую природу данных

¹⁰ Лореш М.А. Разработка и исследование алгоритмов муравьиной колонии для решения задач оптимального размещения предприятий: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.13.01 / Омский государственный университет им. Ф.М. Достоевского. Омск, 2006. 20 с.

¹¹ Кочетов Ю.А. Методы локального поиска для дискретных задач размещения: дис. ... д-ра физ.-мат. наук: 05.13.18 / Институт вычислительной математики и математической геофизики Сибирского отделения РАН. Новосибирск, 2009. 267 с.

¹² Климентова К.Б. Оценки оптимальных значений и методы решения задач размещения с предпочтениями клиентов: дис. ... канд. физ.-мат. наук: 05.13.01 / Институт динамики систем и теории управления Сибирского отделения РАН. Иркутск, 2010. 124 с.

¹³ Садыков А.М. Методы и средства поддержки принятия решений по размещению промышленных объектов на основе моделей зонирования: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.01 / Владимирский государственный университет им. А.Г. и Н.Г. Столетовых. Иваново, 2014. 144 с.

методов, что делает их применение нетривиальной задачей, так как для каждого алгоритма и различных его реализаций и для каждого класса оптимизационных задач скорость работы, точность, сходимость, влияние условий задачи и эвристических коэффициентов требуют особого исследования.

Анализируя в целом методы дискретной оптимизации на предмет соответствия обозначенным ранее критериям, с которыми должен соотноситься метод поиска оптимального размещения объектов инфраструктуры здравоохранения, можно сказать следующее:

- в случае использования методов, позволяющих получать относительно приемлемый результат, при большом количестве объектов для пространственной оптимизации требуется длительный период вычислений, при этом, как правило, отсутствуют возможности для распараллеливания процесса выполнения алгоритма;

- отсутствуют возможности учета динамики изменения характеристик исследуемых сущностей во времени и динамики пространственного размещения исследуемых сущностей;

- отсутствует возможность учета структуры взаимосвязей между исследуемыми сущностями (динамичная связанность сервисов при их использовании).

Решение задачи размещения объектов инфраструктуры здравоохранения с использованием методов геоинформатики

Информативным способом оценки условий размещения объектов на территориях является их представление на географических картах и планах. Использование карт для пространственного анализа выступает важной составляющей геоинформационных систем (ГИС). Применение геоинформационных технологий позволяет оценить эффективность пространственной организации объектов инфраструктуры, выявить проб-

лемные участки и разработать мероприятия по устранению существующих проблем [8].

ГИС предоставляют широкий выбор универсальных подходов к анализу пространственного размещения объектов социальной инфраструктуры, в том числе и инфраструктуры здравоохранения [9]. Одной из основных задач, которые решаются в ГИС, является определение близости объектов. К одному из самых часто используемых инструментов этой группы можно отнести построение буфера вокруг объектов. Часто возникают задачи, связанные со статистическим анализом атрибутивных данных. Также ему подвергается информация по площади, длине и количеству объектов. Эффективность использования ГИС допускает комплексное использование различных методов обработки и анализа данных в контексте тематики пространственного размещения объектов инфраструктуры на основе разветвленных алгоритмов и даже способствует ему. ГИС-анализ позволяет устанавливать закономерности распределения и пространственные взаимосвязи в данных. С практической точки зрения результаты ГИС-анализа помогают рассчитывать оптимальные расстояния до точек интереса, рационализировать пространственные сети инфраструктуры [10].

Существуют различные методы решения задачи размещения объектов с использованием ГИС [11–16]. С их помощью определяется необходимое количество новых объектов и координат их размещения для покрытия некой территории зоны обслуживания пунктами обслуживания с учетом минимизации стоимости обслуживания и максимизации территории обслуживания¹⁴. Критерии оптимизации задаются с учетом существующих пространственных и социально-экономических условий [17]. Пространство решений может быть непрерывным, когда новые объекты могут размещаться в любой его точке, и дискретным, если задано лишь конечное

¹⁴ Основы геоинформатики: учеб. пособие для студ. вузов: в 2 кн. Кн. 1 / Е.Г. Капралов [и др.]; под ред. В.С. Тикунова. М.: Академия, 2004. 352 с.

множество точек, где возможно размещение новых объектов. На практике при решении задачи оптимального размещения объектов широко применяют метод картографического моделирования¹⁵, когда каждый отдельный критерий оптимальности представляется в виде слоя или объекта карты – так называемых «слоев пригодности», слой итоговой целевой функции получается в результате их картографического комбинирования.

Выделяют следующие преимущества геоинформатики, которые упрощают решение задачи пространственного размещения объектов [12]:

- дает возможность классификации задач размещения по типу размещаемых объектов (точечные, линейные и площадные);
- позволяет определить условия размещения;
- дает возможность представить начальные условия и результат решения задачи в картографической форме и в форме деловой графики;
- позволяет широкому кругу пользователей осуществлять пространственное моделирование с представлением визуальных моделей в картографической или иной форме.

В целом ГИС нельзя назвать полностью самостоятельным инструментом оптимизации пространственного размещения объектов. При решении данных задач они используют методы, разработанные в рамках иных направлений. Но, с другой стороны, с учетом существующих реалий геоинформатику можно позиционировать в качестве одного из значимых элементов решения таких задач. Это связано с тем, что они интегрируют большие наборы атрибутивной и географической информации с мощным инструментарием пространственного анализа. Значительные перспективы в области поддержки принятия решений по пространственному размещению объектов имеет связка ГИС с имитационным моделированием.

Решение задачи размещения объектов инфраструктуры здравоохранения с использованием методов имитационного моделирования

Имитационное моделирование обеспечивает подробное описание системы и позволяет анализировать ее динамические характеристики [18; 19]. В настоящее время отмечается существенный рост научного интереса к проблемам компьютерного моделирования систем в сфере общественного здравоохранения [20; 21]. При этом в основном используются четыре подхода: метод Монте-Карло, системная динамика, дискретно-событийное моделирование и агент-ориентированное моделирование. Их выбор для решения конкретной задачи осуществляется на основании анализа моделируемой системы или проблемы.

Моделирование по методу Монте-Карло – это метод моделирования, основанный на повторяющейся статистической выборке для приблизительного решения количественных задач. Метод Монте-Карло успешно применим в моделировании систем с высокой изменчивостью входных вероятностей, а также многими неопределенными параметрами или тогда, когда затруднительно получить должный результат с помощью простого детерминированного алгоритма [22].

Моделирование и симуляция системной динамики служат для формализации и осмысления совокупного поведения системы во времени [21]. Оно предполагает высокий уровень агрегации объектов и фокусируется на моделях поведения, генерируемых структурой обратных связей внутри системы, а не на влиянии в значительной степени случайных внешних событий.

Метод дискретно-событийного моделирования подходит для программного конструирования динамики или поведения объективной системы в дискретные промежутки времени. Динамика в состоянии системы при этом вызвана событиями, происходящими мгновенно во времени в узлах или местах обработки [24].

¹⁵ Прозорова Г.В. Основы создания и использования электронных карт в программных продуктах семейства ArcGIS: учебн.-метод. пособие. Тюмень: ТюмГНГУ, 2012. 124 с.

Агент-ориентированное моделирование имеет генеративный характер, позволяющий формализовать системные объекты в разных степенях абстракции [25]. Среди плюсов агентного моделирования – возможность формализовать сложные объекты и явления, проистекающие из тривиальных правил, гибкость при описании допущений, относящихся к агентам и параметрам контекста. Все это дает основания работать с реалистичными сценариями, где агенты проявляют гибкость в стратегиях поведения.

В настоящее время наиболее часто решаемой задачей пространственного расположения объектов инфраструктуры здравоохранения с использованием имитационных моделей выступает задача оптимального местоположения отделений скорой помощи [26]. Большинство из реализованных моделей [27–30] являются дискретно-событийными. Вместе с тем ряд авторов утверждает, что традиционные методы моделирования имеют ограниченные возможности и перспективы для адекватного анализа сложных систем, тогда как агент-ориентированное моделирование в этом плане обладает неоспоримыми преимуществами [31; 32].

Общая последовательность использования моделей для выбора наиболее оптимальных мест размещения сервисов аналогична той, что применяется в дискретной оптимизации. Здесь также исследователи сталкиваются с проблемой большого количества вычислений, связанной с необходимостью перебора и сравнения большого количества возможных вариантов. Специфика имитационных моделей заключается в том, что стратегия выбора точек размещения сервисов может быть встроена непосредственно в алгоритмы модели. Таким образом, возможны три варианта проведения оптимизационных экспериментов: 1) предварительное выделение возможных вариантов размещения объектов вне рамок имитационной модели и проведение последующих экспериментов с полученным набором; 2) разработка отдельных взаимосвязанных имитационной и оптимизационной моделей; 3) встраива-

ние оптимизационных механизмов в логику работы модели.

Рассмотрим существующую практику применения механизмов перебора в имитационных моделях. Пример первого подхода описан в работе [33], где рассматривается проблема размещения образовательных учреждений. Авторами предложено использовать предварительное зонирование моделируемой территории средствами ГИС в зависимости от значений демографических, социально-экономических и экономических показателей, описывающих их уровень развития, затем в рамках выделенных зон определять точки возможного расположения объектов. С выделенными объектами производятся модельные эксперименты.

Использование второго подхода описано О.И. Бабиной [34]. Авторами рассматриваются вопросы применения имитационного моделирования во взаимосвязи с методами оптимизации в рамках концепции оптимизации имитационного моделирования [35; 36]. Оптимизационная модель — модель, характерной чертой которой является наличие одной (однокритериальная модель) или нескольких (многокритериальная модель) целевых функций, позволяющих находить наилучшее решение из числа рассматриваемых альтернатив. Оптимизация заключается в последовательном выполнении нескольких прогонов модели с различными значениями параметров и нахождении оптимальных для данной задачи значений этих параметров, при которых целевая функция достигает своего экстремума. В качестве оптимизационных алгоритмов используются методы, разработанные в рамках дискретной оптимизации.

Третий подход возможно реализовать в агент-ориентированных моделях, где сервисы могут выступать в качестве агентов, а значит иметь собственную модель поведения, в том числе в части территориального размещения. Один из возможных вариантов подобного поведения описан в рамках сетей потребностей и возможностей (ПВ-сети) [35]. Модель ПВ-сети базируется на подходе, в рамках которого предприятие декомпози-

руется до уровня сети отдельных автономных сущностей, каждая из них отождествляется с агентами потребностей и возможностей. Задача состоит в том, чтобы каждый агент потребности нашел соответствующего агента возможности. Характеры заказов и ресурсов оказываются прямо противоположными: ресурсы более консервативны и должны стремиться быть максимально использованными и просуществовать как можно больший срок, а заказы, наоборот, более активны и стремятся как можно быстрее реализоваться с наилучшими характеристиками, в частности как можно меньше использовать ресурсы, чтобы меньше потратить денег на расчеты с ними. Единство и борьба этих противоположностей реализуется через постоянный поиск соответствия между ними, обусловленный заданными индивидуальными критериями для каждой из сторон (качество, деньги, время и т. д.). Суть такой операции для каждой из сущностей состоит в том, чтобы обнаружить все имеющиеся на внутреннем рынке предприятия альтернативные возможности или потребности и принять решение об установлении связи, которая отвечает улучшению заданного критерия или набора критериев при условии, что и противоположный партнер (ресурс или заказ) согласен на установление такой связи. Точно так же можно представлять медицинские сервисы, которые могут перемещаться в рамках обозначенного перечня мест на территории в поисках наиболее выгодных для себя возможностей предоставления услуг, конкурируя и кооперируясь при этом. Для указанных целей могут быть использованы алгоритмы роевого интеллекта.

В целом следует сказать о том, что использование имитационного моделирования дает возможность учитывать различные переменные и не сводит многокритериальные задачи к однокритериальным [38]. Имитационное моделирование представляет собой высокую стоимость реализации, но более подробно описывает систему¹⁶ и

позволяет анализировать динамические эффекты [39; 40]. Эти особенности делают подход к моделированию мощным инструментом принятия решений для пространственного размещения объектов.

Рассматривая методы имитационного моделирования с точки зрения критериев, с которыми должен соотноситься метод поиска оптимального размещения объектов инфраструктуры здравоохранения, следует признать, что весомым преимуществом агент-ориентированного моделирования является возможность учитывать динамику изменения характеристик исследуемых сущностей во времени и динамику их пространственного размещения, а также структуру взаимосвязей между исследуемыми сущностями. Это позволяет в потенциале получать более качественные результаты. Однако следует учитывать, что объем вычислений при его использовании может быть наиболее существенным. Но здесь время поиска приемлемого решения может значительно сокращаться за счет возможности использовать механизм параллельных вычислений.

Заключение

Проблематика оптимального пространственного размещения объектов инфраструктуры здравоохранения на сегодняшний день является актуальной. При этом ее решение лежит в плоскости компетенций каждого государства. Специфика Российской Федерации, где имеются огромные малозаселенные территории с плохой транспортной инфраструктурой, существенно повышает сложность решения данной задачи. Это определяет необходимость иметь на государственном уровне соответствующий инструментарий, позволяющий решать подобные задачи. В настоящее время в качестве такового используется исключительно нормативный метод, который при всех своих достоинствах не способен давать качественный результат. Нужно отметить, что существует ряд иных методов решения

¹⁶ Матренин П.В. Разработка адаптивных алгоритмов роевого интеллекта в проектировании и управлении техническими системами: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.13.01 / Национальный исследовательский Томский государственный технический университет. Томск, 2018. 25 с.

оптимизационных задач пространственного размещения объектов, позволяющих находить более качественные решения. Их использование имеет специфику применительно к конкретной предметной области.

В связи с этим авторами рассмотрены наиболее распространенные методы пространственной оптимизации применительно к потенциалу их использования в качестве инструмента по нахождению схемы рационального размещения объектов инфраструктуры здравоохранения. Для этого была формализована общая задача пространственного размещения объектов инфраструктуры здравоохранения. Формализация позволила определить ряд критериев, с которыми должен соотноситься метод поиска оптимального размещения объектов инфраструктуры здравоохранения. Использование при проведении анализа наиболее распространенных в практике методов пространственной оптимизации позволяет говорить о перспективности агент-ориентированного моделирования для решения обозначенной задачи. В связи с этим особую актуальность приобретают вопросы, связанные с созданием методологической базы по разработке подобных оптимизационных моделей. Вопрос, какой из перечисленных методов и подходов к формализации региональной сети здравоохранения является предпочтительным, не имеет простого ответа. Выбор методического инструментария и информационной базы зависит исключительно от поставленных исследовательских и прикладных задач. Более того, возможна комбинация различных элементов в рамках реализации проектов. Однако проведенный анализ позволяет утверждать, что агент-ориентированное моделирование как способ формализации и дальнейшего совершенствования систем пространственного размещения объектов инфраструктуры здравоохранения об-

ладает рядом преимуществ, среди которых функциональность, ориентация на существующие отношения между агентами друг с другом и со средой. При этом необходимо помнить, что любая модель является лишь упрощенной копией действительности, удобной для исследований и манипуляций. Работоспособность и прикладная ценность агентных моделей зависит от того, насколько заложенные в них принципы отражают объективную ситуацию, насколько точно в них воспроизводятся существенные критерии действий реальных субъектов, институтов и параметры окружающей среды. Иными словами, агентное моделирование является предпочтительным только в том случае, когда программное наполнение моделей становится результатом глубокого концептуального осмысления реальности – существующей системы общественного здравоохранения, включая нормативно-правовые, структурные, институциональные, поведенческие и прочие аспекты. Так, для получения правдивой информации о мотивах, практиках и стратегиях поведения агентов (пациентов, медицинских работников) подойдут социологические опросы, интервью, которые, к тому же, позволят дифференцировать агентов по половозрастным, имущественным, социальным и другим признакам, что повысит валидность и прикладную ценность построенной модели.

Таким образом, представленная работа вносит вклад в развитие теоретических аспектов применения методов пространственной оптимизации объектов инфраструктуры здравоохранения в Российской Федерации. Дальнейшее использование и развитие полученных результатов послужит весомым подспорьем при решении важнейшей государственной задачи по качественному обеспечению населения медицинскими услугами.

ЛИТЕРАТУРА

1. Friedmann J. *Regional development policy*. Boston, Mass. Inst. Techn, 1966.
2. Зубаревич Н.В. Развитие российского пространства: барьеры и возможности региональной политики // Мир новой экономики. 2017. № 2. С. 46–57.
3. Трофименко А.С. Моделирование оптимизации сети медицинских учреждений в условиях реструктуризации здравоохранения // SCI-ARTICLE.RU. 2015. № 17. URL: <http://sci-article.ru/stat.php?i=1419161781> (дата обращения 12.10.2020).
4. Skiena S.S. *The Algorithm Design Manual*. Springer, 2008. 730 p.
5. Карманов В.Г. Математическое программирование. М.: Наука, 1986. 288 с.
6. Алексеева Е.В., Орлов А.В. Генетический алгоритм для конкурентной задачи о р-медиане // Методы оптимизации и их приложения: Тр. XIV Байкал. междунар. школы-семинара. Т. 1. Северобайкальск, 2008. С. 570–585.
7. Катермина Т.С., Синькевич С.С. Применение комбинированного генетического алгоритма к решению задачи коммивояжера // МЖПИ. 2017. Т. 7. № 2. С. 65–71. DOI: 10.12731/2227-930X-2017-2-2-65-71
8. Глотов А.А. Медицинская ГИС – основа интегральной оценки благополучия региона // GEOMATICS. 2013. № 3. С. 45–49.
9. Цветков В.Я. Геоинформационные системы и технологии. М.: Финансы и статистика, 1998. 288 с.
10. Митчелл Э. Руководство по ГИС-анализу. Ч. 1. Пространственные модели и взаимосвязи: пер. с англ. Киев: ЗАО ЕСОММ Со; СтилоС, 2000. 198 с.
11. Горбунов В.С. Использование модели Й. фон Тюнена в современной региональной экономике // Моск. экон. журн. 2017. № 2. С. 1–10.
12. Цветков В.Я., Семушкина С.Г. Геоинформационный анализ задач размещения // Вестн. Моск. гос. обл. пед. ун-та. Сер.: Экономика. 2009. № 4. С. 61–64.
13. Цветков В.Я., Ознамец В.В., Филатов В.Н. Решение задачи Лаунхардта в нечеткой ситуации // Информация и космос. 2018. № 4. С. 103–109.
14. Комбинаторные методы и алгоритмы решения задач дискретной оптимизации большой размерности / В.Р. Хачатуров [и др.]. М.: Наука, 2000. 360 с.
15. Гимади Э.Х. Задача размещения на сети с центральносвязными областями обслуживания // Управляемые системы: сб. науч. тр. Новосибирск: Ин-т математики СО АН СССР. 1984. № 25. С. 38–47.
16. Цветков В.Я. Геомаркетинг: Прикладные задачи и методы. М.: Финансы и статистика, 2002. 240 с.
17. Васютинская С.И. Применение геоинформатики для решения экономических задач // Перспективы науки и образования. 2015. № 5. С. 125–129.
18. Агент-ориентированная суперкомпьютерная демографическая модель России: анализ апробации / В.Л. Макаров [и др.] // Экономические и социальные перемены: факты, тенденции, прогноз. 2019. Т. 12. № 6. С. 74–90. DOI: 10.15838/esc.2019.6.66.4
19. Россюшанская Е.А. Комплексная агент-ориентированная модель воспроизводства трудового потенциала муниципального образования // Экономические и социальные перемены: факты, тенденции, прогноз. 2019. Т. 12. № 1. С. 124–137. DOI: 10.15838/esc.2019.1.61
20. Моделирование эпидемии COVID-19 – преимущества агент-ориентированного подхода / В.Л. Макаров [и др.] // Экономические и социальные перемены: факты, тенденции, прогноз. 2020. Т. 13. № 4. С. 58–73. DOI: 10.15838/esc.2020.4.70.3
21. Laker L.F., Torabi E., France D.J. et al. Understanding emergency care delivery through computer simulation modeling. *Academic Emergency Medicine. Official Journal of the Society for Academic Emergency Medicine*, 2018, vol. 25 (2), pp. 116–127. DOI: 10.1111/acem.13272

22. Law A.M. *Simulation Modeling & Analysis*. McGraw-Hill, 2007. 768 p.
23. Sterman J.D. System dynamics modeling: Tools for learning in a complex world. *California Management Review*, 2001, no. 4, pp. 8–25.
24. Banks J, Carson J.S., Nelson B.L., Nicol D. *Discrete-event System Simulation*. 5th ed. Upper Saddle River. New Jersey: Prentice Hall. 2009. 622 p.
25. Bazghandi A. Techniques, advantages and problems of agent based modeling for traffic simulation. *International Journal of Computer Science Issues*, 2012, vol. 9, pp. 115–119.
26. Дианов С.В., Швецов А.Н. Имитационное моделирование системы неотложной медицинской помощи // Вестн. ВоГУ. Сер.: Технические науки. 2020. № 2 (8). С. 27–33.
27. Бегичева С.В. Компьютерное моделирование пространственного местоположения станций скорой медицинской помощи в условиях крупного города // Фундаментальные исследования. 2019. № 6. С. 24–28.
28. Aboueljine L., Sahin E., Jemai Z., Marty J. A simulation study to improve the performance of an emergency medical service: Application to the French Val-de-Marne department. *Simul. Model. Pract. Theory*, 2014, vol. 47, pp. 46–59.
29. Zhen L., Wang K., Hu H., Chang D. A simulation optimization framework for ambulance deployment and relocation problems. *Computers & Industrial Engineering*, 2014, vol. 72, pp. 12–23.
30. Aringhieri R. An integrated DE and AB simulation model for EMS management. In: *Proceedings of the 2010 IEEE Workshop on Health Care Management*, 2010. Pp. 1–6.
31. Anagnostou A., Nouman A., Taylor S.J.E. Distributed hybrid agent-based discrete event emergency medical services simulation. In: *Proceedings of the 2013 Winter Simulation Conference*, 2013. Pp. 1625–1636.
32. Cassidy R., Singh N.S., Schiratti P. et al. Mathematical modelling for health systems research: a systematic review of system dynamics and agent-based models. *BMC Health Serv. Res.*, 2019, vol. 19, p. 845. Available at: <https://doi.org/10.1186/s12913-019-4627-7> (accessed 12.10.2020).
33. Исмагилова Л.А. Модель территориального размещения объектов сферы услуг // Вестн. УГАТУ. 2009. Т. 12. № 3 (32). С. 134–140.
34. Бабина О.И. Разработка оптимизационной имитационной модели для поддержки процессов планирования складских систем // Компьютерные исследования и моделирование. 2014. Т. 6. № 2. С. 295–307.
35. Eskandari H., Darayi M., Geiger D.Ch. Using simulation optimization as a decision support tool for supply chain coordination with contracts. *Proceedings of the 2010 Winter Simulation Conference*, 2010. Pp. 1306–1317.
36. Pichitlamken P., Nelson B.L. Optimization via simulation: a combined procedure for optimization via simulation. *Proceedings of the 2002 Winter Simulation Conference*, 2002. Pp. 292–300.
37. Виттих В.А., Скобелев П.О. Мультиагентные модели взаимодействия для построения сетей потребностей и возможностей в открытых системах // Автоматика и телемеханика. 2003. № 1. С. 177–185.
38. Павленко С.С. Решение задачи выбора местоположения контейнерных центров грузораспределения // Вестн. АГТУ. Сер.: Морская техника и технология. 2015. № 4. С. 93–102.
39. Berchi R., Fontana G., Pagliosa A., Bonora R., Sesana G. A five steps methodology for an ambulance planning. *Proceedings of the 2010 IEEE Workshop on Health Care Management*, 2010. Pp. 1–5.
40. Morohosi H., Furuta T. Optimization model and simulation for improving ambulance service system. *11th International Symposium on Operations Research and its Applications in Engineering, Technology and Management*, 2013. Pp. 23–25.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Сергей Владимирович Дианов – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Вологодский научный центр Российской академии наук». Российская Федерация, 160014, г. Вологда, ул. Горького, д. 56а; e-mail: dianov.sv@mail.ru

Константин Николаевич Калашников – кандидат экономических наук, старший научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Вологодский научный центр Российской академии наук». Российская Федерация, 160014, г. Вологда, ул. Горького, д. 56а; e-mail: konstantino-84@mail.ru

Василий Александрович Ригин – заведующий лабораторией, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Вологодский научный центр Российской академии наук». Российская Федерация, 160014, г. Вологда, ул. Горького, д. 56а; e-mail: riginva@mail.ru

Dianov S.V., Kalashnikov K.N., Rigin V.A.

SEARCH FOR WAYS OF OPTIMAL SPATIAL PLACEMENT OF HEALTHCARE INFRASTRUCTURE FACILITIES: A REVIEW OF METHODOLOGICAL TOOLS

The article deals with the topical issue of territorial management in modern Russia: the search for ways and tools to optimize the spatial location of healthcare networks that meet the accessibility requirements of medical services and economic feasibility for population. The main purpose of the research is to review the existing approaches to optimizing the spatial placement of objects in terms of possibilities of their use in relation to solving a more specific and applied problem: the placement of health infrastructure facilities in the Russian Federation. The main tasks for its achievement are the following: setting the task of optimizing the spatial placement of healthcare infrastructure facilities; determining the existing optimization methods suitable for solving the identified problems; analyzing the possibilities of their use and forming proposals for the use of the most promising of them in the practice of state and municipal authorities of the Russian Federation. The authors carry out the research using general scientific methods of formalization, abstraction, generalization, and methods of system analysis. The main results of the research are the formalization of spatial placement tasks of healthcare infrastructure objects; the criteria identification with which the method of finding the optimal placement of healthcare infrastructure objects should be correlated, the analysis of the most common methods of spatial optimization in practice; substantiation of the agent-based modeling prospects for solving the problem of spatial placement of healthcare infrastructure objects. The scientific novelty of the obtained results are in the comparative analysis of approaches to the instrumental search for the optimal territorial/spatial placement of social infrastructure facilities, in particular healthcare facilities comparing their strengths and weaknesses and feasibility of applying them to solve practical problems. In the analysis of the most common methods of spatial optimization in practice, their use allows talking about the prospects of agent-based modeling for solving this problem. In this regard, the authors define the methodological basis development for creation of agent-based optimization models as areas for further research.

Healthcare infrastructure objects, spatial optimization methods, geoinformatics, simulation modeling.

REFERENCES

1. Friedmann J. *Regional development policy*. Boston, Mass. Inst. Techn, 1966.
2. Zubarevich N.V. Development of the Russian space: barriers and opportunities for regional policy. *Mir novoy ekonomiki=The World of New Economy*, 2017, no. 2, pp. 46–57 (in Russian).
3. Trofimenko A.S. Modeling the optimization of a network of medical institutions in the context of healthcare restructuring. *SCI-ARTICLE.RU*, 2015, no. 17. Available at: <http://sci-article.ru/stat.php?i=1419161781> (accessed: October 12, 2020; in Russian).
4. Skiena S.S. *The Algorithm Design Manual*. Springer, 2008. 730 p.
5. Karmanov V.G. *Matematicheskoye programmirovaniye* [Mathematical Programming]. Moscow: Nauka, 1986. 288 p.
6. Alekseeva E.V., Orlov A.V. Memetic algorithm for the competitive p -median problem. In: *Metody optimizatsii i ikh prilozheniya: Tr. XIV Байкал'skiye Mezhdunarodnyye shkoly-seminary. Tom 1* [Optimization Methods and Their Applications: XIV Baikal International School, vol. 1]. *Severobaikalsk*, 2008, pp. 570–585 (in Russian).
7. Katermina T.S., Sin'kevich S.S. Application of the combined genetic algorithm to solving the traveling salesman problem. *MZhPI=IJAS*, 2017, vol. 7, no. 2, pp. 65–71. DOI: 10.12731/2227-930X-2017-2-2-65-71 (in Russian).
8. Glotov A.A. Medical GIS – the basis of region safety integrated assessment. *GEOMATICS*, 2013, no. 3, pp. 45–49 (in Russian).
9. Tsvetkov V.Ya. *Geoinformatsionnyye sistemy i tekhnologii* [Geopolitical Information Systems and Technologies]. Moscow: Finansy i statistika, 1998. 288 p.
10. Mitchell E. *Rukovodstvo po GIS-analizu. Chast' 1. Prostranstvennyye modeli i vzaimosvyazi: perevod s angliyskogo* [GIS Analysis Guide. Part 1. Spatial Models and Relationships: Translated from English]. Kiev: ZAO ESOMM Co; Stilos, 2000. 198 p.
11. Gorbunov V.S. Using the model of Y. von Thunen in modern regional economy. *Moskovskiy ekonomicheskij zhurnal=Moscow Economic Journal*, 2017, no. 2, pp. 1–10 (in Russian).
12. Tsvetkov V. Ya., Semushkina S.G. the geoinformation analysis of tasks of accommodation. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo oblastnogo pedagogicheskogo universiteta. Seriya: Ekonomika=Bulletin of the Moscow Region State University. Series: Economics*, 2009, no. 4, pp. 61–64 (in Russian).
13. Tsvetkov V.Ya., Oznamets V.V., Filatov V.N. Task of accommodation of the spatial object based on the use of the fuzzy information situations. *Informatsiya i kosmos=Information and Space*, 2018, no. 4, pp. 103–109 (in Russian).
14. Khachaturov V.R. et al. *Kombinatornyye metody i algoritmy resheniya zadach diskretnoy optimizatsii bol'shoy razmernosti* [Combinatorial Methods and Algorithms for Solving Large-Scale Discrete Optimization Problems]. Moscow: Nauka, 2000. 360 p.
15. Gimadi E.Kh. Location problems on a network with centrally connected service areas. In: *Upravlyayemyye sistemy: sbornik nauchnykh trudov* [Controlled Systems: Collection of Research Papers.]. Novosibirsk: Institute of Mathematics, Siberian Branch of the USSR Academy of Sciences, 1984, no. 25, pp. 38–47 (in Russian).
16. Tsvetkov V.Ya. *Geomarketing: Prikladnyye zadachi i metody* [Geomarketing: Application and Techniques]. Moscow: Finansy i statistika, 2002. 240 p.
17. Vasiutinskaya S.I. Application of geoinformatics for the solution of economic problems. *Perspektivy nauki i obrazovaniya=Perspectives of Science & Education*, 2015, no. 5, pp. 125–129 (in Russian).
18. Makarov V.L. et al. Agent-based supercomputer demographic model of Russia: Approbation Analysis. *Ekonomicheskie i sotsial'nye peremeny: fakty, tendentsii, prognoz=Economic and Social Changes: Facts, Trends, Forecast*, 2019, vol. 12, no. 6, pp. 74–90. DOI: 10.15838/esc.2019.6.66.4 (in Russian).

19. Rossoshanskaya E.A. Integrated agent-based model of labor potential reproduction of a municipal formation. *Ekonomicheskie i sotsial'nye peremeny: fakty, tendentsii, prognoz=Economic and Social Changes: Facts, Trends, Forecast*, 2019, vol. 12, no. 1, pp. 124–137. DOI: 10.15838/esc.2019.1.61 (in Russian).
20. Makarov V.L. et al. COVID-19 epidemic modeling – advantages of an agent-based approach. *Ekonomicheskie i sotsial'nye peremeny: fakty, tendentsii, prognoz=Economic and Social Changes: Facts, Trends, Forecast*, 2020, vol. 13, no. 4, pp. 58–73. DOI: 10.15838/esc.2020.4.70.3 (in Russian).
21. Laker L.F., Torabi E., France D.J. et al. Understanding emergency care delivery through computer simulation modeling. *Academic Emergency Medicine. Official Journal of the Society for Academic Emergency Medicine*, 2018, vol. 25 (2), pp. 116–127. DOI: 10.1111/acem.13272
22. Law A.M. *Simulation Modeling & Analysis*. McGraw-Hill, 2007. 768 p.
23. Sterman J.D. System dynamics modeling: Tools for learning in a complex world. *California Management Review*, 2001, no. 4, pp. 8–25.
24. Banks J., Carson J.S., Nelson B.L., Nicol D. *Discrete-event System Simulation*. 5th ed. Upper Saddle River. New Jersey: Prentice Hall, 2009. 622 p.
25. Bazghandi A. Techniques, advantages and problems of agent based modeling for traffic simulation. *International Journal of Computer Science Issues*, 2012, vol. 9, pp. 115–119.
26. Dianov S.V., Shvetsov A.N. Simulation modeling of emergency health care system. *Vestnik VoGU. Seriya: Tekhnicheskiye nauki=Bulletin of Vologda State University. Series Technical Sciences*, 2020, no. 2 (8), pp. 27–33 (in Russian).
27. Begicheva S.V. Computer simulation of the spatial ambulance location in an urban area. *Fundamental»nyye issledovaniya=Fundamental Research*, 2019, no. 6, pp. 24–28 (in Russian).
28. Aboueljinane L., Sahin E., Jemai Z., Marty J. A simulation study to improve the performance of an emergency medical service: Application to the French Val-de-Marne department. *Simul. Model. Pract. Theory*, 2014, vol. 47, pp. 46–59.
29. Zhen L., Wang K., Hu H., Chang D. A simulation optimization framework for ambulance deployment and relocation problems. *Computers & Industrial Engineering*, 2014, vol. 72, pp. 12–23.
30. Aringhieri R. An integrated DE and AB simulation model for EMS management. In: *Proceedings of the 2010 IEEE Workshop on Health Care Management*, 2010. Pp. 1–6.
31. Anagnostou A., Nouman A., Taylor S.J.E. Distributed hybrid agent-based discrete event emergency medical services simulation. In: *Proceedings of the 2013 Winter Simulation Conference*, 2013. Pp. 1625–1636.
32. Cassidy R., Singh N.S., Schiratti P. et al. Mathematical modelling for health systems research: a systematic review of system dynamics and agent-based models. *BMC Health Serv. Res.*, 2019, vol. 19, p. 845. Available at: <https://doi.org/10.1186/s12913-019-4627-7> (accessed 12.10.2020).
33. Ismagilova L.A. Model of territorial placing objects of sphere of services. *Vestnik UGATU=Vestnik Ufa State Aviation Technical University*, 2009, vol. 12, no. 3 (32), pp. 134–140 (in Russian).
34. Babina O.I. Development of simulation optimization model for support of planning processes of warehouse systems. *Komp'yuternyye issledovaniya i modelirovaniye=Computer Research and Modeling*, 2014, vol. 6, no. 2, pp. 295–307 (in Russian).
35. Eskandari H., Darayi M., Geiger D.Ch. Using simulation optimization as a decision support tool for supply chain coordination with contracts. *Proceedings of the 2010 Winter Simulation Conference*, 2010. Pp. 1306–1317.
36. Pichitlamken P., Nelson B.L. Optimization via simulation: a combined procedure for optimization via simulation. *Proceedings of the 2002 Winter Simulation Conference*, 2002. Pp. 292–300.
37. Vittikh V.A., Skobelev P.O. Multiagent interaction models for constructing the needs-and-means networks in open systems. *Avtomatika i telemekhanika=Automation and Remote Control*, 2003, no. 1, pp. 177–185 (in Russian).

38. Pavlenko S.S. Solution of the task of choosing location of container distribution centers. *Vestnik AGTU. Seriya: Morskaya tekhnika i tekhnologiya*=*Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technologies*, 2015, no. 4, pp. 93–102 (in Russian).
39. Berchi R., Fontana G., Pagliosa A., Bonora R., Sesana G. A five steps methodology for an ambulance planning. *Proceedings of the 2010 IEEE Workshop on Health Care Management*, 2010. Pp. 1–5.
40. Morohosi H., Furuta T. Optimization model and simulation for improving ambulance service system. *11th International Symposium on Operations Research and its Applications in Engineering, Technology and Management*, 2013. Pp. 23–25.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Sergei V. Dianov – Candidate of Sciences (Engineering), Senior Researcher, Federal State Budgetary Institution of Science “Vologda Research Center of the Russian Academy of Sciences”. 56A, Gorky Street, Vologda, 160014, Russian Federation; e-mail: dianov.sv@mail.ru

Konstantin N. Kalashnikov – Candidate of Sciences (Economics), Senior Researcher, Federal State Budgetary Institution of Science “Vologda Research Center of the Russian Academy of Sciences”. 56A, Gorky Street, Vologda, 160014, Russian Federation; e-mail: konstantino-84@mail.ru

Vasilii A. Rigin – Head of Laboratory, Federal State Budgetary Institution of Science “Vologda Research Center of the Russian Academy of Sciences”. 56A, Gorky Street, Vologda, 160014, Russian Federation; e-mail: riginva@mail.ru