

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

MATHEMATICAL MODELING

Научная статья

УДК 004.94, 911.9

<https://doi.org/10.24143/2072-9502-2022-4-78-87>

EDN VEGPUR

Анализ межкомпонентных связей в метагеосистемах на основе имитационного моделирования

*Станислав Анатольевич Ямашкин,
Екатерина Олеговна Ямашкина, Владимир Валерьевич Никулин*✉

*Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н. П. Огарева,
Саранск, Россия, nikulinv@mail.ru*

Аннотация. Решается научная проблема количественного анализа межкомпонентных связей в метагеосистемах разного иерархического уровня на основе имитационного моделирования. Доказано, что исследование структуры и свойств метагеосистем должно быть проведено на основе анализа закономерностей взаимодействия распределенных в пространстве территориальных компонентов. Сформулирован перечень требований, предъявляемых к каркасу имитационных моделей пространственных процессов, представлен алгоритм разработки модели, описывающей пространственно-временные процессы, протекающие в территориальных системах. Выделены два направления развития каркаса имитационного моделирования пространственных процессов: дедуктивный, при которой система построения моделей должна изначально проектироваться с целью достижения возможности покрытия решений максимального количества задач, и индуктивный, в рамках которого положительно зарекомендовавшие себя улучшения частных конкретных моделей становятся основой для развития каркаса имитационного моделирования. Совместное использование дедуктивной и индуктивной стратегий обеспечит эволюционное улучшение каркаса моделирования, а также оптимизацию частных решений, разрабатываемых на его основе. В качестве примера конкретной реализации программного комплекса, демонстрирующего возможности имитационного моделирования для решения задачи анализа межкомпонентных связей в метагеосистемах, разработана информационная система моделирования транспортных потоков городских метагеосистем. Разработанная система состоит из следующих модулей: редактор карт, компонент для работы с базой данных, подсистема визуализации интерактивных графических веб-интерфейсов, вспомогательный модуль для проведения необходимых математических расчетов, подсистема моделирования движения городского трафика, рекомендательная подсистема генерации рекомендаций на основе правил. Реализованный программный комплекс для имитационного моделирования транспортных потоков городских метагеосистем может быть использован для создания динамических транспортных моделей с возможностью прогнозирования характера потока в зависимости от текущей ситуации. Модель служит инструментом для принятия стратегических решений относительно развития пространственной структуры города или региона. Модули системы в совокупности при взаимодействии друг с другом обеспечивают надежную и бесперебойную работу имитационной системы в целом.

Ключевые слова: пространственные данные, имитационное моделирование, метагеосистемы, межкомпонентные связи, пространственное прогнозирование

Благодарности: исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-27-00651, «Цифровые инфраструктуры пространственных данных и модели метагеосистем территорий для устойчивого развития регионов».

Для цитирования: Ямашкин С. А., Ямашкина Е. О., Никулин В. В. Анализ межкомпонентных связей в метагеосистемах на основе имитационного моделирования // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. 2022. № 4. С. 78–87. <https://doi.org/10.24143/2072-9502-2022-4-78-87>. EDN VEGPUR.

Yamashkin S. A., Yamashkina E. O., Nikulin V. V. Analysis of intercomponent relations in metageosystems by using simulation modeling

Original article

Analysis of intercomponent relations in metageosystems by using simulation modeling

Stanislav A. Yamashkin, Ekaterina O. Yamashkina, Vladimir V. Nikulin✉

*National Research Ogarev Mordovia State University,
Saransk, Russia, nikulinvv@mail.ru*✉

Abstract. The article focuses on solving the scientific problem of quantitative analysis of intercomponent relationships in metageosystems of different hierarchical levels by using the method of simulation modeling. Studying the structure and properties of metageosystems proved to be based on the analysis of the regularities of interaction of the territorial components distributed in space. A list of requirements for the framework of simulation models of spatial processes is formulated, an algorithm for developing a model that describes the spatial-temporal processes occurring in territorial systems is presented. There have been singled out two directions for developing the framework of simulation modeling of spatial processes: deductive, in which the model building system must be initially designed in order to achieve the coverage of solutions to the maximum number of tasks, and inductive, in which positive changes in the particular models turn into the basis for the development of the simulation framework. The combined use of deductive and inductive strategies will evolutionize the upgraded modeling framework and optimize the particular solutions developed on its basis. As an example of implementation of a software package that demonstrates the possibilities of simulation modeling for solving the problem of analyzing intercomponent relations in metageosystems there has been developed an information system for modeling traffic flows in urban metageosystems. The developed system consists of the following modules: a map editor, a component for working with a database, a subsystem for visualizing interactive graphical web interfaces, an auxiliary module for performing the necessary mathematical calculations, a subsystem for modeling urban traffic, and a recommender subsystem for generating recommendations based on rules. The implemented software package for simulating traffic flows in urban metageosystems can be used to create dynamic transport models able to predict the flow depending on the situation. The model serves as a tool for making strategic decisions regarding the development of the spatial structure of a city or region. The system modules aggregate interacting with each other and ensure the reliable and uninterrupted operation of the simulation system as a whole.

Keywords: spatial data, simulation modeling, metageosystems, intercomponent links, spatial forecasting

Acknowledgment: the study was supported by the Russian Science Foundation grant No. 22-27-00651, “Digital spatial data infrastructures and models of metageosystems of territories for sustainable development of regions”

For citation: Yamashkin S. A., Yamashkina E. O., Nikulin V. V. Analysis of intercomponent relations in metageosystems by using simulation modeling. *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Management, Computer Science and Informatics*. 2022;4:78-87. (In Russ.). <https://doi.org/10.24143/2073-5529-2022-4-78-87>. EDN VEGPUR.

Введение

Решение научной проблемы разработки многопланового количественного анализа межкомпонентных связей в метагеосистемах разного иерархического уровня должно опираться на построение цифровых моделей геосистем. На первом этапе производится отбор свойств, которые максимально точно отображают изучаемый объект с необходимым уровнем абстракции, затем отбираются переменные, с наибольшей полнотой описывающие выбранные свойства, а также определяются параметры, на которых они наблюдаются (время, пространство, группы). Каждая переменная описывается по основным характеристикам, существенным с методологической точки зрения. На уровне си-

стем данных осуществляется преобразование переменных во множество состояний, отображаемое на едином параметрическом множестве; на уровне порождающих систем полученные данные преобразуются в формы, исходя из природы изучаемого объекта и целей исследования.

Выстраиваемые таким образом модели позволяют решить следующие ключевые задачи:

- 1) оценка силы и характера межкомпонентных связей в метагеосистемах;
- 2) определение количества факторов, описывающих территориальное изменение свойств метагеосистем;
- 3) интерпретация и обоснование физического смысла выделенных факторов.

Решение обозначенных проблем позволяет выстраивать цифровые статистические модели пространственной структуры геосистем на основе непрерывного и дискретного подходов; оценивать полученные модели через количественный анализ качества отображения территориальной изменчивости тех свойств ландшафтов, которые непосредственно не были введены в первоначальную многомерную модель геосистем.

Исследование, представленное в статье, апробировано на практике при разработке системы имитационного моделирования транспортных потоков городских метагеосистем. Реализованный программный комплекс позволяет решить задачу анализа межкомпонентных связей в территориально распределенных системах и может быть использован для создания динамических транспортных моделей с возможностью прогнозирования характера потоков трафика в зависимости от различных условий. Имитационная модель позволяет интегрировать компоненты геосистем и является инструментом для принятия управленческих решений относительно развития пространственной структуры города или региона.

Методология и методы исследования

Анализ структуры и свойств метагеосистем предполагает исследование сложных свойств и закономерностей взаимодействия распределенных и связанных в пространстве компонентов. Алгоритмы машинного обучения и глубокие нейронные сети, в частности, находят широкое применение в решении задачи пространственно-временного прогнозирования. Однако применение таких моделей сопряжено с рядом трудностей и угроз [1]. Во-первых, вследствие того, что нейросетевые модели представляют собой структуры, выстраиваемые и обучаемые на основе стратегии «черного ящика», анализ их поведения для корректировки особенностей принятия решений становится излишне сложным. Во-вторых, обучение глубоких моделей, способных извлекать сложные иерархические признаки о территориальных процессах и системах, требует подготовки огромных банков обучающих данных, в рамках которой необходимо в том числе проведение полевых исследований. В-третьих, неоднозначность решения задачи оценки точности и ошибочности моделей машинного обучения вызывает закономерные опасения экспертов, выраженные в высокой неопределенности при сопоставлении абстрактной математической оценки погрешности модели требованиям стандартов и предъявляемым критериям эффективности. Таким образом, решение задачи пространственно-временного прогнозирования территориально-распределенных процессов следует искать в области методов и алгоритмов, позволяющих анализировать модели систем реального мира

на основе стратегии «белого ящика», предполагающей возможность анализа функционирования каждого компонента сложной системы, которая представляет собой абстракцию реальной территориальной системы и изображает различные внутренние взаимодействия и отношения в ней. Пространственно-временной количественный анализ компонентов данной системы позволяет достичь лучшего понимания распределенных процессов и относительно точного предсказания направлений развития природных и природно-техногенных явлений.

Пространственно-временные модели данных должны обеспечивать симуляцию распределенных в пространстве процессов в трех- или четырехмерном пространстве. В первом случае каждый пространственный объект описывается такими координатами, как широта, долгота и время, во втором может учитываться еще и относительная или абсолютная высота. Моделированию могут подвергаться как природные (гидрологические, геологические, растительные), так и техногенные (хозяйственные, социальные) системы. Актуальное значение имеет организация методологического, архитектурного и программного каркаса, позволяющего трансформировать нечеткие границы и многофакторные характеристики природных явлений в строго формализованные рамки пространственно-временных абстракций. Системные свойства природных и природно-техногенных явлений динамично изменяются при перемещении в пространстве и времени, соответственно, отображение этих внутренних структурных, в том числе иерархических, характеристик должно быть включено в пространственно-временную структуру модели при заданном уровне допущений и абстракции.

Разработка моделей, представляющих и характеризующих сложные динамические распределенные системы, опирается на объектно-ориентированные [2], предметно-ориентированные [3], событийные [4] и графовые [5] подходы. Стратегии моделирования на основе графов используются для пространственно-временного представления процессов и явлений в виде событий. Одним из преимуществ графового моделирования является возможность гибкой интеграции семантических ограничений моделирования и организации формализованного подхода к количественной оценке, учитывающей как пространственную, так и временную организацию территориальных систем.

Сформулируем перечень требований, предъявляемых к каркасу создания имитационных моделей пространственных процессов:

1. Универсальность. Каркас моделирования должен позволять формировать имитационные модели широкого класса природных и природно-техногенных территориальных систем с достаточным уровнем абстракции и репрезентативности.

2. Интерпретируемость. Модели, формируемые на основе каркаса, должны позволять производить прозрачную оценку особенностей функционирования отдельных ее компонентов, а также выявлять причинно-следственные связи между изменением системных характеристик модели и ее составных элементов.

3. Надежность. Модели, разворачиваемые на основе предлагаемого каркаса, должны обеспечивать достаточную минимизацию расхождений между фактическими характеристиками состояния моделируемой территориальной системы и параметрами ее абстрактного представления и рассчитываться на основе алгоритмов, внедряемых в систему.

4. Конфигурируемость и расширяемость. Каркас моделирования должен позволять формировать гибкие модели сложных территориальных систем, легко уточняемые и модифицируемые при появлении новых знаний об анализируемых объектах и процессах.

5. Оптимизированность. Каркас имитационного моделирования должен позволять обрабатывать большие данные о территориальных системах на минимальных вычислительных мощностях.

Моделирование межкомпонентных связей в метагеосистемах

С позиции теоретико-множественного подхода система имитационного моделирования пространственных процессов описывается кортежем множеств $MODEL = GRAPH, AGENTS, SIMULATION$, где $GRAPH$ – графовая модель территориальных систем, описываемая множеством пространственно распределенных компонентов; $AGENTS$ – множество агентов модели, моделирующих перемещение вещества и энергии между компонентами территориальных систем; $SIMULATION$ – множество, определяющее параметрические и алгоритмические особенности подсистемы моделирования.

Графовая модель $GRAPH$ описывает структурную организацию территориальной системы с заданным уровнем абстракции (рис. 1).

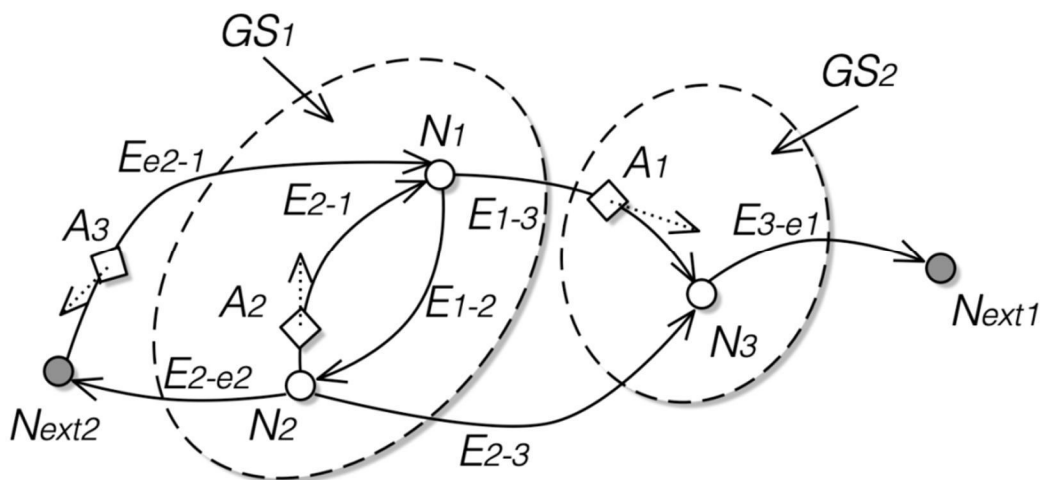


Рис. 1. Обобщенная графовая структура модели:
 N – вершина графа; E – дуга графа; A – агент модели; GS – сегмент

Fig. 1. Generalized graph structure of the model:
 N – graph vertex; E – arc of the graph; A – model agent; GS – segment

Множество вершин графа (N) определяет выделенные территориальные компоненты системы. Каждая вершина характеризуется координатной привязкой в декартовых (относительных) и географических (абсолютных) координатах. Необходимость уточнения модели приводит к необходимости добавления к каждой вершине ассоциированных атрибутов и методов. Вершины графа могут быть внутренними (принимающими на вход потоки объектов из других вершин модели) и граничными (моделирующими внешние связи рассматриваемой геосистемы).

Множество дуг графа (E) описывает существующие связи между территориальными объектами, каналы, в рамках которых осуществляется перенос вещества и энергии. Для описания емкостных характеристик связей целесообразно использовать элементы теории систем массового обслуживания (очереди). Каждая дуга E_i и вершина N_j графа $GRAPH$ описывается набором статических (инвариантных) и динамических параметров. Модель маршрута RT_k описывается характеристикой длины ($length_k$), начальной ($source_k$) и конечной ($target_k$) вершинами, множествами входящих в него вершин (N_k) и дуг (E_k):

Yamashkin S. A., Yamashkina E. O., Nikulin V. V. Analysis of intercomponent relations in metageosystems by using simulation modeling

$$\begin{cases} E_i = EP_{i,static}, EP_{i,dynamic}, i = \overline{1, e}; \\ N_j = EP_{j,static}, EP_{j,dynamic}, j = \overline{1, n}; \\ RT_k = length_k, source_k, target_k, N_k, E_k, k = \overline{1, r}. \end{cases}$$

Для увеличения гибкости модели территориальной системы графовая модель *GRAPH* может быть поделена на множество сегментов *GS*. Через сегменты могут быть определены паттерны централизованного каскадного управления свойствами множества вершин модели. Например, принадлежность набора вершин *N* сегменту *GS_i* может определять появление у этих вершин набора атрибутов с заданными значениями и методов, описывающих конкретные особенности поведения. Наконец, сегменты графа могут организовываться в многоуровневую структуру для моделирования иерархической организации соподчиненных геосистем.

Агенты модели (А). Важнейшим компонентом функционирования природных и природно-техногенных пространственных систем является обмен энергией между территориальными компонентами. Связи между территориальными системами реализуются также посредством передачи вещества (поток воздуха, воды, твердых масс, живых организмов). Данный аспект может быть реализован посредством агентного моделирования, в рамках которого децентрализованные абстрактные объекты системы, описываемые множеством атрибутов и методов, перемещаются и трансформируются в рамках модели исходя из собственного состояния, а также состояния системы в целом и ее отдельных компонентов. Благодаря агентному компоненту реализуется моделирование восходящих связей системы.

Отдельный агент модели *A_i* в рамках каждого дискретного этапа моделирования трансформируется и перемещается в рамках графовой структуры модели на основе следующих положений (аспектов):

- множество допустимых решений, заложенных в виде набора алгоритмов и стратегий выбора поведения. Этот аспект определяет степень свободы в поведении агента и может включать такие действия, как смена маршрута перемещения, остановка, начало перемещения, изменение собственных параметров состояния;

- текущее и прогнозируемое состояние агента. Посредством набора свойств состояния (текущих и исторических) реализуется достижение уровня абстракции для описания пространственных объектов разной природы: агрегатное состояние веществ, динамические характеристики объектов, мотивация участников движения;

- текущее и прогнозируемое состояния наблюдаемых компонентов модели или системы в целом. Данная группа параметров принятия решения определяет возможность реагирования на изменение внешних условий, включая наличие внешнего воздействия (слияние и разделение гидрологических

потоков, взаимодействие систем дорожного трафика, развитие экзогеодинамических процессов);

- опыт взаимодействия с агентами и элементами модели. Эта группа положений трансформируется с течением времени исходя из накапливаемого опыта, позволяя моделировать взаимодействия умных, обучающихся систем. Может быть реализована на основе обучения с подкреплением через трансформацию агента на основе оценки влияния окружающей среды в ответ на принятие определенных решений.

Подсистема моделирования *SIMULATION* определена набором управляющих алгоритмов *CONTROLLERS* и системных параметров *PARAMETERS*. В рамках реестра управляющих алгоритмов функционирует алгоритм генерации агентов модели, расчета маршрутов перемещения агентов системы, моделирования и анализа законов трансформации модели, визуализации результатов моделирования. Системные параметры также представлены статичными параметрами *MP_{static}* (неизменными во времени характеристиками, имеющими пространственные и атрибутивные свойства) и динамичными *MP_{dynamic}* характеристиками (величинами, изменяющимися с течением времени).

Алгоритм разработки имитационной модели, описывающей пространственно-временные процессы, которые протекают в сложных территориальных системах, должен включать следующую последовательность этапов:

1. Определение задачи и сценариев использования системы. В ходе данного проектного этапа определяется перечень проблем, на решение которых направлена разрабатываемая имитационная модель, а также определяется реестр ключевых прецедентов, формирующий пространство функциональности проектируемого решения.

2. Проектирование и детализация модели. На данной стадии производится декомпозиция и уточнение базового каркаса имитационной модели для решения конкретных задач, проводится сбор численных данных, оценка статистических характеристик системы, выдвигаются гипотезы об определении уровня абстракции модели, обеспечивающей допустимую точность моделирования и достижение целевых эффектов.

3. Алгоритмическая конкретизация модели. В рамках этого этапа проводится разработка необходимого перечня алгоритмов, определяющих функционирование конкретной реализации системы имитационного моделирования пространственно протекающих процессов, направленной на решение частных задач анализа природных и природно-техногенных процессов.

4. Реализация графического интерфейса и подсистемы визуализации. На этой ступени предлагается и разрабатывается интерфейсная составляющая

системы, которая должна определить способы взаимодействия с моделью, методы и средства анализа ее функционирования, оптимизации и уточнения.

5. Итерационная апробация системы имитационного моделирования, позволяющая не только моделировать конкретные пространственно-временные процессы, но и осуществлять калибровку модели, уточнять реестр используемых данных, оптимизировать качество получаемого результата.

Следует выделить два направления развития каркаса имитационного моделирования пространственных процессов. С одной стороны, необходимо придерживаться дедуктивной стратегии, при которой система построения моделей должна изначально проектироваться с целью достижения возможности покрытия решений максимального количества задач, с другой – необходимо максимально эффективно реализовывать индуктивную стратегию, в рамках которой положительно зарекомендовавшие себя улучшения частных конкретных моделей становятся основой для развития каркаса имитационного моделирования. Совместное использование дедуктивной и индуктивной стратегий обеспечит эволюционное улучшение каркаса моделирования, а также оптимизацию частных решений, разрабатываемых на его основе.

Имитационное моделирование транспортных территориальных систем

Имитационное моделирование позволяет с необходимым приближением проанализировать сложные процессы дорожного движения, оценить эффективность и последствия тех или иных направлений преобразования инфраструктуры техногенных мегаэосистем. Результатом научно-исследовательских работ, представленных в данной статье, является имитационная модель транспортной сети (как компонента мегаэосистем города), реализующая задачу планирования качественного и количественного развития существующей инфраструктуры для обеспечения эффективной работы городского хозяйства и безопасности участников дорожного движения.

Пользователь системы имеет возможность управлять параметрами генерации потока автомобилей (общего числа автомобилей в системе; минимальной, средней и максимальной скорости движения автомобилей во время имитационного моделирования). Пользователь системы имеет возможность редактировать маршруты следования автомобилей в рамках картографической основы посредством интерактивного изменения графа дорожной сети в рамках веб-интерфейсов.

Граф-модель дорожной сети *GRAPH* описывается следующими множествами: множеством вершин (перекрестков) N , ребер-дуг (дорог) маршрутов E и возможных маршрутов RT . Каждая дуга

E_i и вершина N_j графа-модели *GRAPH* описывается набором статичных (инвариантных) и динамических параметров. Модель маршрута RT_k описывается характеристикой длины ($length_k$), начальной ($source_k$) и конечной ($target_k$) вершинами, множествами входящих в него перекрестков (N_k) и дорожных участков (E_k). Значительное влияние на проектирование модели оказывает выбор уровня детализации. На различных масштабах влияние отдельных факторов может проявляться сильнее, в то время как учет других показателей можно пренебречь. Возможна интеграция крупно- и среднемасштабных моделей посредством зонирования мегаэосистем.

Группа статичных параметров EP_{static} характеризует свойства, остающиеся неизменными с течением времени в рамках построенной модели: начальная и конечные вершины, длина дорожного участка, пропускная способность, тип дорожного покрытия, качество дорожного покрытия, класс автомобильной дороги, коэффициент снижения пропускной способности и другие показатели. Динамические параметры $EP_{dynamic}$ включают характеристики, изменяющиеся с течением времени: число агентов на ребре в данное время моделирования, коэффициент загруженности, количество наработанных штрафных баллов. Статические параметры вершины NP_{static} характеризуются меткой-описанием, декартовыми координатами, географическими координатами, размером. Динамические параметры $NP_{dynamic}$ могут определять число конструирующих за перекресток агентов.

В качестве демонстрационного примера программного комплекса, реализующего возможности имитационного моделирования для решения задачи анализа межкомпонентных связей в мегаэосистемах, разработана информационная система моделирования транспортных потоков городских мегаэосистем. Разработанная система состоит из следующих модулей: редактор карт, компонент для работы с базой данных, подсистема визуализации интерактивных графических веб-интерфейсов, вспомогательный модуль для проведения необходимых математических расчетов, подсистема моделирования движения городского трафика, рекомендательная подсистема генерации рекомендаций на основе правил. Модули системы в совокупности при взаимодействии друг с другом обеспечивают надежную и бесперебойную работу имитационной системы в целом. Описание ключевых классов системы имитационного моделирования потоков вещества и энергии в мегаэосистемах, включающее характеристику решаемой задачи, атрибуты и методы, представлено в таблице.

Классы системы моделирования
 Simulation system classes

Класс	Задача	Атрибут	Метод
Main Module	Главный модуль системы, определяющий архитектурные особенности ее реализации	Информация о запуске моделирования, графе территориальной системы (вершины, ребра, маршруты), текущее время симуляции, данные о сгенерированных агентах (в том числе находящихся в процессе перемещения в настоящий момент)	Инициализация модели, проверка связности графа территориальной системы, активация и обработка процесса движения агентов, обработка итераций моделирования и смены дней и времени суток
User Actions Handler Module	Определение особенностей взаимодействия пользователей с системой	Подключаемые модули стилизации и компоненты расширений	Запуск, приостановка и остановка имитационного моделирования; создание, импорт, удаление модели; интерактивное редактирование графа (параметров вершин и дуг) модели
Generate Recommendations Module	Формирует рекомендации по трансформации свойств объектов модели согласно правилам	Информация о ребрах графа территориальной системы	Сбор информации о загрузке дорог, проверка количества «штрафных баллов» у ребер графа с формированием рекомендаций по улучшению территориальных объектов и связей, визуализация рекомендаций
Map Actions Module	Работа с интерактивной графовой моделью территориальной системы	Данные о текущих координатах отображения карты и созданном графе территориальной системы	Рендеринг интерактивной карты в момент импорта модели, перерисовка при трансформации графа и при моделировании
Road Traffic Generation Module	Генерация дорожного графика с заданными параметрами	Данные о каждом агенте системы, ребрах и вершинах графа территориальной системы и всех сгенерированных маршрутах перемещения агентов	Расчет маршрута перемещения агентов системы; обновление параметров нагрузки ребер во время моделирования, обновление визуальных характеристик ребра
Data Base Module	Интеграция системы с базой данных	Информация о данных для обновления в БД (вершины и ребра графа, сгенерированные агенты)	CRUD-манипуляции с данными (добавление, чтение, обновление, удаление)
Default Settings Module	Хранение в приложении базовых настроек	Информация о состоянии процесса моделирования (итерации и времени выполнения с привязкой к дням и времени суток), параметрах графа территориальной системы; данные о количестве агентов на участке (текущие и исторические); параметры обновления интерактивной карты; данные о типе системных связей	Чтение и запись настроечных параметров моделирования с валидацией
Draw Charts Module	Рендеринг статистических данных на диаграммах	Информация о точках на оси абсцисс, данные для отрисовки допустимой и фактической загруженности ребра графа, суточной интенсивности движения, процента времени, когда ребро было фактически перегружено	Вывод информации о суточной интенсивности движения (в том числе в реальном времени), об интервалах времени, когда выбранное ребро было фактически перегружено, о загруженности всех ребер графа одновременно
Auxiliary Module	Вспомогательные функции для обеспечения процесса моделирования	Вывод перечня вспомогательных методов	Конвертация пространственных и временных величин; поиск кратчайшего маршрута между двумя вершинами графа территориальной системы на основе алгоритма Дейкстры, модифицированного посредством применения эвристик; генераторы псевдослучайных чисел и идентификаторов

Для обеспечения интерактивных свойств системы моделирования в качестве основного языка разработки выбран JavaScript, позволяющий в полной мере манипулировать объектной моделью документа в рамках веб-интерфейсов, размеченных на основе языка HTML. Серверная часть приложения функционирует на базе операционной системы Linux и веб-сервера Nginx. В качестве базовой картографической основы использованы данные Stamen. Для реализации интерактивного поведения цифровых карт в рамках веб-интерфейсов использованы библиотеки Leaflet.js (для отображения картографической основы) и Sigma.js (для визуализации графовой модели).

Модуль работы с визуализацией данных реализован для возможности получения пользователем статистической информации о ребрах графа (интенсивность обмена энергией и веществом между метагеосистемами; соотношение допустимой и максимальной загруженности ребра; процент времени, когда ребро было перегружено) в режиме онлайн. Визуально модуль предоставляет пользователю информацию в трех различных видах: линейный график, столбчатая диаграмма и радиальная диаграмма (рис. 2): на радиальной диаграмме полярным углом определено время имитационной модели, а полярным радиусом – нагрузка ребра, измеряемая количеством агентов.



Рис. 2. Диаграмма визуализации параметров межкомпонентных связей метагеосистем (на примере городской транспортной сети)

Fig. 2. Diagram of visualizing the parameters of intercomponent relations of metageosystems (a case study of urban transport network)

Модуль генерации рекомендаций по улучшению структуры пространственной системы реализован для того, чтобы пользователь в режиме онлайн получал информацию о тех ребрах построенного им графа, у которых фактическая пропускная способность оказалась больше максимально допустимой (рассчитывается динамически).

Результатом работы системы имитационного моделирования транспортных потоков как компонента техногенных метагеосистем становится выявление проблемы перегрузки нескольких ребер построенного графа. Кроме того, система позволяет посмотреть почасовую статистику всех ребер на одном интерфейсном экране. Данная функция позволяет пользователю сделать выводы о загруженности каждого ребра и спланировать трансформа-

цию техногенных метагеосистем без потери пропускной способности на соседних дорогах путем распределения нагрузки на каждое из них.

Заключение

Решение научной проблемы количественного анализа межкомпонентных связей в метагеосистемах разного иерархического уровня возможно на основе имитационного моделирования. В статье сформулирован набор требований, предъявляемых к каркасу имитационных моделей пространственных процессов, а также представлен алгоритм разработки модели, описывающей пространственно-временные процессы, протекающие в территориальных системах.

В качестве примера конкретной демонстрации программного комплекса, реализующего возможности имитационного моделирования для решения задачи анализа межкомпонентных связей в метагеосистемах, разработана информационная система моделирования транспортных потоков городских метагеосистем. Реализованный программный комплекс может быть использован для создания динамических транспортных моделей с возможностью прогнозирования характера потока в зависимости от текущей ситуации. Он интегрирует компоненты системы в единую модель, которая впоследствии служит инструментом для принятия стратегических решений относительно развития пространственной структуры города или региона.

Предложенный подход к анализу межкомпонентных связей в метагеосистемах на основе имитационного моделирования применим для анализа сложных пространственно-распределенных процессов разного класса: техногенных и природных. Для этой цели необходимо решить задачу построения цифровых моделей уровня структурированных систем, реализующих выявление отношений между геосистемными переменными на основе методов статистики и алгоритмов имитационного моделирования и позволяющих оценить силу и характер межкомпонентных связей; определить факторы варьирования свойств геосистем, интерпретировать и обосновать их физический смысл.

Список источников

1. Ямашкин С. А. Структура регионального геопортала как инструмента публикации и распространения геопространственных данных // Науч.-техн. вестн. Поволжья. 2015. № 6. С. 223–225.
2. Valiante M., Guida D., Della Seta M., Bozzano F. A spatiotemporal object-oriented data model for landslides (LOOM) // Landslides. 2021. V. 18. N. 4. P. 1231–1244.
3. Janečka K. Standardization supporting future smart cities – A case of BIM/GIS and 3D cadastre // GeoScape.

2019. V. 13. N. 2. P. 106–113.

4. Katwal R., Li J., Zhang T., Hu C., Rafique M. A., Zheng Y. Event-based and continuous flood modeling in Zijinguan watershed, Northern China // Natural Hazards. 2021. V. 108. N. 1. P. 733–753.

5. Xu C., Liu W. Integrating a Three-Level GIS Framework and a Graph Model to Track, Represent, and Analyze the Dynamic Activities of Tidal Flats // ISPRS International Journal of Geo-Information. 2021. V. 10. N. 2. P. 61.

References

1. Yamashkin S. A. Struktura regional'nogo geoportala kak instrumenta publikatsii i rasprostraneniia geoprostranstvennykh dannykh [Structure of regional geoportal as tool for publishing and distributing geospatial data]. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik Povolzh'ia*, 2015, no. 6, pp. 223-225.
2. Valiante M., Guida D., Della Seta M., Bozzano F. A spatiotemporal object-oriented data model for landslides (LOOM). *Landslides*, 2021, vol. 18, no. 4, pp. 1231-1244.
3. Janečka K. Standardization supporting future smart cities – A case of BIM/GIS and 3D cadastre. *GeoScape*,

2019, vol. 13, no. 2, pp. 106-113.

4. Katwal R., Li J., Zhang T., Hu C., Rafique M. A., Zheng Y. Event-based and continuous flood modeling in Zijinguan watershed, Northern China. *Natural Hazards*, 2021, vol. 108, no. 1, pp. 733-753.

5. Xu C., Liu W. Integrating a Three-Level GIS Framework and a Graph Model to Track, Represent, and Analyze the Dynamic Activities of Tidal Flats. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 2021, vol. 10, no. 2, p. 61.

Статья поступила в редакцию 22.09.2022; одобрена после рецензирования 30.09.2022; принята к публикации 17.10.2022
The article is submitted 22.09.2022; approved after reviewing 30.09.2022; accepted for publication 17.10.2022

Информация об авторах / Information about the authors

Станислав Анатольевич Ямашкин – кандидат технических наук, доцент; доцент кафедры автоматизированных систем обработки информации и управления института электроники и светотехники; Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н. П. Огарева; yamashkinsa@mail.ru

Stanislav A. Yamashkin – Candidate of Sciences in Technology, Associate Professor; Associate Professor of the Department of Automated Information Processing and Control Systems of Institute of Electronics and Lighting Technology; National Research Ogarev Mordovia State University; yamashkinsa@mail.ru

Екатерина Олеговна Ямашкина – преподаватель кафедры инфокоммуникационных технологий и систем связи института электроники и светотехники; Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н. П. Огарева; coladanova@yandex.ru

Ekaterina O. Yamashkina – Lecturer of the Department of Infocommunication Technologies and Communication Systems of Institute of Electronics and Lighting Technology; National Research Ogarev Mordovia State University; coladanova@yandex.ru

Владимир Валерьевич Никулин – кандидат технических наук, доцент; заведующий кафедрой инфокоммуникационных технологий и систем связи института электроники и светотехники; Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н. П. Огарева; nikulinvv@mail.ru

Vladimir V. Nikulin – Candidate of Sciences in Technology, Associate Professor; Head of the Department of Infocommunication Technologies and Communication Systems of Institute of Electronics and Lighting Technology; National Research Ogarev Mordovia State University; nikulinvv@mail.ru

