

А.В. ИВАЩЕНКО, О.К. ГОЛОВНИН, А.А. ГОЛОВНИНА, Е.А. ДОДОНОВА
**КОМБИНИРОВАННАЯ ГЕОИНФОРМАЦИОННАЯ
МНОГОСЛОЙНАЯ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ
МОДЕЛЬ**

Иващенко А.В., Головнин О.К., Головнина А.А., ДодONOва Е.А. **Комбинированная геоинформационная многослойная пространственно-временная модель.**

Аннотация. Современные технологии организационного управления предусматривают сбор и обработку большого объема данных для расчета параметров функционирования исследуемых объектов и процессов. Поскольку основная особенность собираемых параметров состоит в их привязке к территориям, с одной стороны, и отнесении к периодам времени, с другой стороны, требуется применение геоинформационных систем и технологий. Несмотря на развитие современных геоинформационных технологий, вопросы их практического применения для поддержки принятия решений с учетом комбинированного влияния пространственного и временного факторов, в полной мере не решены. В статье предложена комбинированная геоинформационная многослойная пространственно-временная модель, которая представляет собой граф, вершинами которого являются значения параметров, упорядоченные по слоям с размещением временных меток в слой времени, а дугами – отношения между ними, разделенные на три типа: топологические, семантические и хронологические. Сопряжение и упорядочивание параметров, согласно предложенной модели, позволяет корректно поставить и решить задачу оптимизации, а, следовательно, устранить проблему практического использования накапливаемой аналитики в процессах поддержки принятия управленческих решений. Предложенная модель использована в цифровой платформе интегрального мониторинга для цифровой трансформации процессов сбора, анализа и визуализации данных коммунальных ресурсов. Рассмотрена общая задача управления, а также приведен конкретный пример для одной из актуальных задач регионального управления – социальной газификации, в котором производится оптимизация процесса обработки заявок по подключению жилых домов к системе газоснабжения в границах выбранного региона. Комбинированная геоинформационная многослойная пространственно-временная модель позволяет формулировать универсальные постановки задач поддержки принятия решений для различных приложений геоинформатики в логистике, при управлении транспортными ресурсами, а также в ситуационных центрах управления предприятиями и регионами, в системах бизнес-аналитики и управления организационными системами.

Ключевые слова: геоинформационная система, геоинформационная модель, пространственная модель, пространственно-временная модель, пространственная оптимизация, интегральный мониторинг, ГИС.

1. Введение. Современные технологии организационного управления предусматривают сбор и обработку большого объема данных. Например, планирование и реализация мероприятий социально-экономического развития регионов в настоящее время основывается на результатах мониторинга и бизнес-аналитики, для чего активно внедряются информационные системы поддержки принятия управленческих решений. Повсеместное внедрение

информационных технологий и цифровая трансформация процессов позволяет обеспечить руководство регионов данными практически по всем аспектам общественной жизни населения.

Однако большой объем информации и множество взаимозависимостей затрудняет ее обработку в рамках поддержки принятия управленческих решений. Обычно лицо, принимающее решения, сосредотачивается на наиболее критичных, важных для конкретного региона показателях. Сформирована система показателей, по которым осуществляется государственный контроль. Однако задачи прогнозирования и оптимизации показателей социально-экономического развития на системном уровне в настоящее время до конца не решены.

Для того чтобы устранить этот недостаток, предлагается в рамках цифровых систем интегрального мониторинга и управления предусмотреть включение контура поддержки принятия решений. Поскольку основная особенность собираемых показателей состоит в их привязке к территориям субъектов Российской Федерации, регионов, районов, населенных пунктов, конкретных домовладений и т.п., с одной стороны, и отнесении к периодам времени (годам, кварталам, месяцам, суткам и т.п.), с другой стороны, решение видится в области внедрения геоинформационных систем и технологий.

Расширение возможностей современных геоинформационных систем в направлении реализации функциональности моделирования и прогнозирования может быть произведено за счет добавления в модель параметра времени как нового измерения с разбиением геоинформационных данных на слои, соответствующие разным этапам развития обстановки во времени, разным вариантам развития обстановки (ситуациям), а также разным масштабам представления обстановки лицам, принимающим решения.

В данной статье представлена такая модель, позволяющая описывать динамику развития обстановки в пространстве и времени, а также результаты ее реализации для планирования ресурсного снабжения жителей региона на примере их подключения к газораспределительной сети.

2. Существующие подходы к решению проблемы. В рамках теории геоинформационных систем (ГИС) [1, 2] обычно рассматривают понятие геоинформационного пространства – среды, в которой функционируют цифровая геоинформация и геоизображения разных видов и назначения. Геоинформационное пространство содержит совокупность геоинформационных территориальных моделей обстановки, охватывающих наземные,

подземные и надземные пространственные объекты, связанные между собой единой координатной основой.

В ГИС геоинформационное пространство может быть представлено в двумерном и трехмерном видах, а существующие объекты в качестве своих характеристик обязательно имеют геометрический размер и координату, по которой можно однозначно определить их расположение в пространстве. В современных ГИС существует возможность задания полигональных пространственных объектов, линий, обозначения регионов и территорий. Возможно также обобщение нескольких объектов в один и, наоборот, их декомпозиция в случае изменения масштаба.

Модель «Пространство-время» расширяет геоинформационное пространство путем введения дополнительного равноправного временного измерения [3]. Нерелятивистская классическая механика рассматривает время как универсальную величину измерения, которая является однородной во всем пространстве и которая отделена от пространства. Классическая механика предполагает, что время имеет постоянную скорость течения, которая не зависит от состояния движения наблюдателя [4].

В философии концепция связи пространственно-временных координат описывается с помощью модели хронотопа [5, 6]. Функциональная определенность пространственно-распределенных групп образуется за счет увязки во времени, скоростях, ритмах и сроках действия [7]. Взаимосвязь временных и пространственных отношений играет существенную роль в литературе [8]. В рамках имитационного моделирования можно реализовать своеобразное перемещение в пространстве-времени, что соответствует изменению объектов и их расположению в пространстве.

В системах геоинформационного мониторинга и аналитики [9, 10] геоинформационная пространственно-временная модель расширяется путем добавления информационных слоев, описывающих изменение заданного набора параметров в пространстве и времени. Эти слои используются как для визуализации многомерных данных, так и для их аналитической обработки средствами статистического анализа. Каждый слой может описывать изменения, как отдельного параметра, так и агрегированного показателя, обобщающего разную информацию, поступающую из нескольких источников. В результате формируется пространственно-временная модель.

Проблемы моделирования и анализа данных активно изучаются в современной теории геоинформационных систем [11 – 13]. С точки

зрения компьютерных наук понятие «пространство» занимает особое место [14]. Параметр «время» часто вводится как дополнительный в модели, учитывающей отраслевые особенности предметной области исследования [15, 16]. Этот параметр играет существенную роль при сборе географических данных в режиме реального времени, например, в дистанционном зондировании Земли [17, 18].

Также отмечается высокая актуальность решения задачи внедрения ГИС в нефтяной и газовой отраслях [19], где динамика изменения параметров ниже, но сложность их представления возрастает благодаря появлению новых зависимостей между объектами.

В зарубежной литературе вопросам развития современных геоинформационных систем и их приложений уделяется особое внимание [20, 21]. Логическому отношению пространства и времени в геоинформационном пространстве посвящена статья [22]. Отмечается, что время и пространство интегрированы и равноправны в формировании потоков, событий и процессов. Такой подход позволяет по-новому рассматривать проблемы моделирования и системного анализа в рамках вычислительной геоинформатики [23].

В статье [24] предложен новый «временно-географический» аналитический подход к решению задачи моделирования процессов взаимодействия людей и животных в пространстве и времени. В работе [25] представлена модель данных, интегрированных по времени, для геологического картирования. Особое внимание уделено концептуализации взаимоотношений между пространством и временем при моделировании геологических данных.

Статья [26] описывает результаты моделирования времени, изменений и темпоральности в ГИС. Моделирование движения в пространстве открывает новые возможности восприятия геоинформационной среды и построения дополнительных измерений в цифровых представлениях пространственно-временных встреч. Особенности интеграции временных параметров в ГИС посвящена работа [27].

О роли времени в географических исследованиях, способах его представления в предметно-ориентированных моделях, детализации измерений времени и тесной интеграции пространства и времени сообщается в обзоре [28]. Моделирование времени связано с представлением событий [29, 30]. Отмечается, что интеграция времени в ГИС требует всестороннего анализа пространственно-временных явлений. Для решения этой задачи использована концептуальная событийно-ориентированная модель времени и пространства, подходящая для географических приложений.

Выделение событий как отдельных сущностей позволяет упорядочить моменты изменения характеристик объектов и территорий во времени и реализовать их хранение в реляционной базе данных. Темпоральная логика на основе событий как отдельных концептов обеспечивает инструментарий для адаптивной дискретизации процессов, при которой поток событий имеет неравномерную дискретизацию, определяемую темпо-ритмом изменения обстановки, например, в режиме реального времени.

В системах бизнес-аналитики [31, 32] геоинформационное пространство отображается в виде информационных срезов, посвященных описанию отдельных аспектов рассматриваемой проблемы. Обычно такое представление осуществляется в виде двумерных графиков на специализированных виджетах, отображающих динамику изменения отдельных параметров, либо взаимные корреляционные зависимости между несколькими параметрами, позволяющими выявить причинно-следственные связи. Информационные виджеты обычно привязываются визуально к пространственным объектам, сгруппированным по слоям в ГИС.

Такое представление обстановки схематично выглядит в виде графа (сети) заданного вида, наложенного поверх геоинформационной подложки (карты) с дополнительными справочными контекстными графиками, описывающими динамику изменения ситуации во времени. Оно позволяет применять современные алгоритмы оптимизации и алгоритмы теории графов [33, 34].

Описанный подход широко используется в ГИС транспортной и авиационной логистики и на железнодорожном транспорте, в системах дистанционного зондирования Земли, в ситуационных центрах и мониторинговых платформах регионального и государственного управления и многих других практических приложениях [35 – 37]. Однако применение задач бизнес-аналитики для поддержки принятия управленческих решений затруднено в силу большого объема отображаемых данных и сложности настройки такой системы для каждого отдельного случая. На практике такие системы широко применяются для мониторинга обстановки, сбора информации и подготовки аналитических отчетов, однако решать на их основе оптимизационные задачи затруднительно в силу отсутствия единой методики выполняемых операций.

В [38] отмечается растущая тенденция к использованию ГИС в качестве одного из компонентов системы поддержки принятия решений для семантической интеграции данных и использования экспертного интеллекта. Необходимость организации доступа

в системах поддержки принятия решений к различным наборам пространственных данных, а также к функциональным возможностям ГИС и средствам анализа многокритериальных решений отмечается и в [39]. В [40] показано, что включение платформы ГИС в систему планирования распределительной сети может значительно повысить производительность труда планировщиков.

Таким образом, геоинформационные многослойные пространственно-временные модели предназначены для решения задач визуализации данных не только в системах распределенного мониторинга, бизнес-аналитики, экспертной оценки и информационной поддержки принятия решений, но и в системах управления организационными системами. Однако, для этой области необходимо решение задач многокритериальной оптимизации, что затруднено в силу сложности и неоднородности данных, полученных с различными временными характеристиками и сгруппированных по множеству пространственных слоёв. Для решения этой задачи в практических приложениях можно предложить следующую модель.

3. Комбинированная геоинформационная многослойная пространственно-временная модель. Опишем каждую точку в геоинформационном пространстве в локальной системе координат в виде переменной

$$\gamma_k = \{x_k, y_k, z_k\}, \quad (1)$$

где x_k, y_k, z_k – пространственные координаты точки в трехмерном пространстве в локальной (местной) системе координат.

Отметим, что точка γ_k также может быть задана в глобальной системе координат в виде тройки географических координат: широта ϕ_k , долгота λ_k и высота h_k :

$$\gamma_k = (\phi_k, \lambda_k, h_k). \quad (2)$$

Рассмотрим каждый информационный слой, отображаемый средствами геоинформационной системы, в виде множества значений параметров для показателя w_i :

$$v_{i,j,k} = v_{i,j,k} (w_i, t_{i,j,k}, g_{i,j,k}), \quad (3)$$

где $v_{i,j,k}$ – значение параметра, принадлежащее одному из множеств: пустое множество, множество целых чисел, множество вещественных чисел, множество символов, множество строк;

$t_{i,j,k}$ – временная метка контроля (измерения);

$g_{i,j,k}$ – отметка о наличии значения параметра в геоинформационном пространстве $\{\gamma_k\}$.

Будем считать, что для существующих, то есть известных значений параметра $v_{i,j,k}$ отмечается $g_{i,j,k} = true$. Это означает существование узла координатной сетки в точке $(\varphi_k, \lambda_k, h_k)$. Отсутствующие значения параметра соответствуют $g_{i,j,k} = false$.

Комбинированная геоинформационная многослойная пространственно-временная модель может быть задана множеством точек $v_{i,j,k}$. Однако, в геоинформационных системах некоторые параметры обстановки, т.е. значений параметров в определенный момент времени с учетом пространственного расположения, удобно задавать относительно заданной области пространства, или региона $G_m = \{\gamma_k, \tau_{k,m}\}$, $m = 1..N_G$ в виде обобщенного параметра, формирующего свой геоинформационный слой для каждого показателя w_i :

$$V_{i,m,n} = \sum_{j,k} v_{i,j,k} \cdot \delta(g_{i,j,k} \in G_m) \cdot \delta(t_{i,j,k} \in \Delta T_n), \quad (4)$$

где $\delta(x) = \begin{cases} 1, & \text{если } x = true, \\ 0, & \text{если } x = false. \end{cases}$;

ΔT_n – временной интервал контроля (актуальности) обобщенного показателя.

Таким образом, комбинированная геоинформационная многослойная пространственно-временная модель представляет собой граф, вершинами которого являются значения параметров $v_{i,j,k}$, упорядоченные по слоям, сформированным для каждого показателя w_i , с размещением временных меток в слое времени.

Дуги графа представляют логические связи значений параметров $v_{i,j,k}$, которые можно разделить в свою очередь на три типа:

- топологические – отношение территориальной или транспортной доступности, определяемые взаимным расположением отметок $g_{i,j,k}$;
- семантические – отношение семантической близости параметров, определяющих их включение в один слой;
- хронологические – отношение следования событий контроля (измерения) параметров по времени $t_{i,j,k}$.

В качестве значений контролируемого показателя w_i может выступать, например, количество оказанных услуг, их стоимость, доходность, своевременность и т.п.

В предложенной модели геоинформационное пространство является дискретным и представляется в виде череды событий изменения значений параметров обстановки, каждое событие привязано к географической координате и моменту времени возникновения. Можно считать, что события изменения параметров упорядочены по времени в интервальной темпоральной логике.

Интервалы между событиями, описывающими изменение разных параметров или последовательное изменение одного параметра, могут быть разными, что позволяет описывать их с помощью моделей неэквидистантных временных рядов [41]. Эти модели могут описывать потерю информации о событии с заданной вероятностью, «дрожание» момента события по времени, что связано в основном с задержками фиксации изменения параметра, или задавать адаптивную дискретизацию временного ряда, описывающего изменение параметра, что свойственно процессам с изменяющейся динамикой развития обстановки.

Использование интервальной темпоральной логики, то есть учет временного аспекта при описании параметров, с одной стороны, позволяет достаточно гибко описывать изменения обстановки, уточняя последовательность событий в случае более высокой динамики и наоборот, увеличивая масштаб в случае малых изменений обстановки или их отсутствия. С другой стороны, такой подход требует реализации интервальной логики сравнения потоков событий между собой. В этом случае невозможно точно задать одновременность возникновения событий и их взаимосвязь, в связи с чем, предполагается устанавливать данные факты в случае, если

разница по времени между событиями не превышает определенной величины, установленной пропорционально масштабу наблюдений.

Предложенная модель позволяет описывать также несколько вариантов развития обстановки, что предоставляет достаточно удобный инструмент для имитационного моделирования. События, характеризующие разные варианты развития обстановки, могут выстраиваться в независимые или взаимосвязанные цепочки, что влияет на изменение выбранного набора параметров, описывающих ситуацию.

В этом случае, например, можно выделить отдельно сценарии негативного, позитивного или нейтрального варианта развития обстановки. Отметим, что неравномерная дискретизация событий по времени также здесь обеспечивает возможность описания этих сценариев с разной плотностью событий, соответствующей разной динамике.

Высокая динамика развития обстановки, фиксируемой в реальности или построенной в результате имитационного моделирования, отображается оператору в виде последовательно упорядоченных ситуаций. Это позволяет ему судить о скорости и важности принимаемых решений. Таким образом, дополнительно к основным параметрам, характеризующим текущую обстановку, могут быть заданы косвенные параметры, свидетельствующие о скорости ее изменения, адаптивной реакции на внешние события и взаимосвязи параметров. Например, небольшое событие может требовать всякий раз перестройки всей наблюдаемой картины параметров, что характеризует его важность и значимость для принятия решений.

Также различия динамики событий, описывающих разные сценарии развития обстановки при ее имитационном моделировании, могут характеризовать объективность их описания и достаточность данных для моделирования и оценки. Например, низкая плотность событий изменения обстановки в случае позитивного сценария может свидетельствовать о недостатке исходных данных, в то время как детальная проработка негативного варианта может быть слабо адаптирована к воздействию случайных факторов.

Реализация данной логики в рамках системы поддержки принятия решений или ситуационного центра управления обстановкой позволяет вырабатывать решения не только на основе изменяющихся значений параметров, но и корректировать расчеты значений этих параметров. В этом случае решения должны включать задания по сбору дополнительной информации, уточнению отдельных

фрагментов сценария мониторинга обстановки или ее моделирования, сравнительного сопоставления позитивных и негативных прогнозов.

4. Постановка оптимизационной задачи с использованием комбинированной геоинформационной многослойной пространственно-временной модели. Как было указано выше, предложенная модель позволяет формулировать универсальные постановки задач поддержки принятия решений для различных приложений геоинформатики в логистике, при управлении транспортными ресурсами, а также в ситуационных центрах управления предприятиями и регионами и системах бизнес-аналитики.

Например, представление системы взаимосвязанных показателей в виде графа востребовано при построении системы мониторинга развития региона. Сбор показателей по различным направлениям социально-экономического развития обеспечивает построение достаточно сложной сети взаимосвязанных индикаторов (показателей), использование которых для автоматизированного формирования организационно-управленческих решений традиционно представляет сложность.

Сопряжение и упорядочивание этих индикаторов, согласно предложенной модели, позволяет корректно поставить задачу оптимизации, а следовательно, решить проблему практического использования накапливаемой аналитики в организационном управлении.

В данном разделе рассмотрим общую задачу управления, а в следующем – приведем конкретный пример для одной из актуальных задач регионального управления.

Введем дополнительные обозначения. Пусть задан обобщенный параметр $V_{[service],m_1,n_1} = V_{1,m_1,n_1}$, с областью начальных значений $V_{1,m_1,n_1}(0)$, где $t'_0 = t'_{1,m_1,n_1}(0)$ – начальная отметка времени. Определим целевой параметр как $V_{[goal],m_2,N_2} = V_{2,m_2,N_2}$, достижимый в момент времени t'_{2,m_2,N_2} , а также обобщенный параметр ограничения как $V_{[constr],m_3,n_3} = V_{3,m_3,n_3}$.

Сформулируем задачу оптимизации обобщенного параметра в виде:

$$F(w_1, t'_0) = \sum_{m_1, m_2=1}^{NG} \left| V_{[goal], m_2, N_2} - V_{[service], m_1, N_1} \right| \rightarrow \min, \quad (5)$$

$$\forall (m_1 = m_3, n_1 = n_3) : V_{1, m_1, n_1} \leq V_{[constr], m_3, n_3}.$$

Допустим, существует такая функциональная зависимость между $V_{[service], m_1, n_1}$ и другим параметром, $V_{[costs], m_4, n_4} = V_{4, m_4, n_4}$, при которой величина $V_{[costs], m_4, n_4}$ влияет на изменение $V_{[service], m_1, n_1}$. Пример такой зависимости – выделение финансирования на социальное обеспечение отдельных государственных услуг.

В этом случае решение задачи (5) может быть выполнено градиентным методом:

$$V_{[costs], m_4, n_4}^{(s+1)} = V_{[costs], m_4, n_4}^{(s)} - k_{m_4} \cdot \nabla \sum_{G_m} \left| V_{[service], m_1, n_1} \right|^2;$$

$$\sum_{m_1, m_2=1}^{NG} V_{[costs], m_4, n_4}^{(s+1)} \leq \Delta C_{n_4}^{(s+1)}(w_4); \quad (6)$$

$$\forall (m_1 = m_3, n_1 = n_3) : V_{1, m_1, n_1} \leq V_{3, m_3, n_3}.$$

Отметим, что в данной модели не обязательна синхронизация изменений $V_{[costs], m_4, n_4}$ и $V_{[service], m_1, n_1}$ по времени, так как справедливо только, что

$$\forall (i, m) : t'_{i, m, n}^{(s+1)} > t'_{i, m, n}^{(s)};$$

$$t'_{[service], m, n}^{(s)} \geq t'_{[costs], m, n}^{(s)}. \quad (7)$$

Решение также сохраняется при наличии множественных зависимостей $V_{[service], m_1, n_1}$ от нескольких $V_{[costs], m, n}$.

Для решения данной задачи на практике упростим ее следующим образом. Обычно в системах организационного управления требуется на основе данных мониторинга по различным индикаторам или показателям эффективности выбрать, какие мероприятия наиболее важны для реализации. Например, в региональном управлении в условиях ограниченного финансирования речь идет о периодической расстановке приоритетов

между разными программами и проектами. При этом внешние условия на каждой итерации принятия решений также изменяются.

Пусть пространство целей также меняется во времени и задается на текущую дату. Тогда задачу можно преобразовать к виду:

$$F(w_1, t') = \sum_{m_1, m_2=1}^{N_G} \left| V_{[goal], m_2, n_2} - V_{[service], m_1, n_1} \right| \rightarrow \min, \quad (8)$$

$$\forall (m_1 = m_3, n_1 = n_3) : V_{1, m_1, n_1} \leq V_{[constr], m_3, n_3}.$$

Для такой постановки практически полезное решение может быть представлено в виде матрицы приоритетов:

$$P_{[service], m_1, n_1}^{(s+1)} = \frac{\left| V_{[goal], m_2, n_2}^{(s)} - V_{[service], m_1, n_1}^{(s-1)} \right| - \left| V_{[constr], m_3, n_3}^{(s)} - V_{[service], m_1, n_1}^{(s-1)} \right|}{\left| V_{[costs], m_4, n_4}^{(s)} - V_{[costs], m_4, n_4}^{(s-1)} \right|}. \quad (9)$$

5. Задача планирования заявок с использованием комбинированной геоинформационной многослойной пространственно-временной модели. Рассмотрим пример использования временной модели для оптимизации процесса обработки заявок по подключению жилых домов к системе газоснабжения в границах выбранного региона. Этот процесс называют газификацией, отдельно выделяется социальная догазификация, призванная подвести газ к домам в газифицированных населенных пунктах в соответствии с постановлением Правительства РФ от 13.09.2021 N 1547.

Процесс социальной догазификации может быть автоматизирован с использованием цифровой платформы интегрального мониторинга [42 – 44]. Цифровая платформа позволяет реализовать мониторинг и контроль заявок на подключение газа и выполняемых работ по их исполнению. При этом оптимизация работ состоит в консолидации заявок и планировании ресурсов.

На рисунке 1 представлен пример района подключений. Точками отмечены домовладения, требующие подключения к системе газоснабжения. Кластеризация точек подключения, например, по абрису преграды ландшафта, позволяет группировать работы по подключению и планировать их с учетом имеющихся ресурсов. Другим критерием для планирования работ является срок подключения: законодательством

установлены сроки подключения частных домов по программе догазификации, которые составляют до 9 месяцев.

Географическая обстановка в данном случае выступает в качестве системы ограничений, поскольку она влияет на стоимость и трудоемкость выполнения работ. Логично предположить, что последовательное освоение близких локаций более выигрышно, чем случайный проход распределенных в пространстве точек.

Фактор времени также ограничивает область допустимых решений. Регламент подключения определяет интервалы допустимых смещений в случае опережения или опоздания и задает интервальную темпоральную логику возможных объединений нескольких подключений между собой.

Планирование мероприятий по догазификации частных домовладений представляет собой многокритериальную задачу, которая может быть поставлена и решена в терминах предложенной модели.

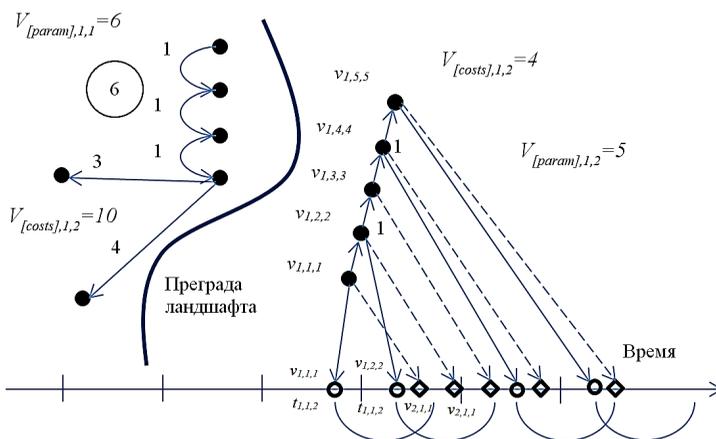


Рис. 1. Пример заявок на догазификацию

Для оптимизации стоимости подключения в рамках решения данной задачи предлагается организационная новация – планировать подключение газа домовладениям при отсутствии заявок в случае технологической оптимальности таких действий. Данный подход не лишен недостатков, в частности он требует проактивной позиции газовых служб по предложению услуг населению, что может привести к дополнительным расходам. Однако, с учетом общей цели полномасштабной газификации России, эти затраты компенсируются сокращением временных и материальных расходов за счет

комплексного подхода по социально-экономическому развитию территорий.

Обозначим пространство заявок на догазификацию $v_{i,j,k}$, $t_{i,j,k}$ – время поступления заявки, $t'_{i,j,k}$ – плановое время исполнения заявки. Фактическое время исполнения может отличаться от планового, однако на рассматриваемом этапе принятия решений это можно не учитывать.

Тогда задачу планирования мероприятий по догазификации можно сформулировать в виде:

$$\begin{aligned} \sum_{m,n} V_{[service],m,n} &\rightarrow \max; \\ \sum_{m,n} V_{[costs],m,n} &\rightarrow \min; \end{aligned} \quad (10)$$

где $V_{[service],m,n} = \sum_{j,k} e_{j,k} \cdot \delta(g_{i,j,k} \in G_m)$ – консолидация заявок;

$V_{[costs],m,n} = \sum_{j,k} c_{j,k} \cdot \delta(g_{i,j,k} \in G_m)$ – общая стоимость;

$e_{j,k} = v_{1,j,k}$ – заявки на подключение, единиц;

$c_{j,k} = v_{2,j,k}$ – стоимость подключения (перехода от одной заявки к другой), рублей;

$t'_{i,j,k} - t_{i,j,k} \leq \Delta\tau$ – ограничение на срок подключения;

$\Delta\tau$ – норматив на выполнение заявки, мес.

Таким образом, для решения задачи планирования заявок предлагается представить сеть подключений в виде модели, содержащей два пространственных слоя и один временной.

6. Алгоритм планирования заявок с использованием комбинированной геоинформационной многослойной пространственно-временной модели. Данная задача в указанной постановке может быть решена путем поиска групп вершин на графе и состоит из 2 частей.

Первая часть – группировка вершин по технологической доступности. Данная часть алгоритма является частным случаем задачи поиска компонент связности – следует разбить вершины графа на несвязные группы так, чтобы внутри группы можно было пройти от одной вершины до любой другой, а между группами пути

отсутствуют. Идея алгоритма стандартна – находим для каждой непройденной вершины все смежные непройденные. Шаги алгоритма:

Шаг 1. Выбираем любую непройденную вершину $e_{j,k}$;

Шаг 2. Помечаем ее как пройденную;

Шаг 3. Каждую смежную вершину добавляем в компонент связности $V_{1,m,n}$, переходим на нее;

Шаг 4. Повторяем Шаги 2 и 3 пока остаются переходы;

Шаг 5. Переходим к Шагу 1 пока не пометим все вершины.

Вторая часть – топологическая сортировка по времени и стоимости, выполняется для каждой группы (компоненты связности) $V_{1,m,n}$.

Вариант 1 (ASAP, срочное распределение, при котором критерием выступает наименьшее время реализации заявки):

Шаг 1. Устанавливаем для всех вершин $t'_{i,j,k} = t_{i,j,k}$;

Шаг 2. Переходим на самую раннюю вершину группы;

Шаг 3. Переходим в следующую смежную вершину по ребру наименьшей стоимости $c_{j,k}$;

Шаг 4. Корректируем $t'_{i,j,k} \rightarrow \min$, при условии $t'_{i,j,k} - t_{i,j,k} \leq \Delta\tau$ если для вершины существует заявка $e_{j,k} = 1$;

Шаг 5. Повторяем Шаги 3 и 4 пока остаются переходы;

Шаг 6. Переходим к Шагу 2 пока не пометим все вершины;

Шаг 7. Фиксируем для группы $V_{[costs],m,n}$.

Вариант 2 (JIT, точное распределение, при котором критерием выступает полное исполнение заявок):

Шаг 1. Устанавливаем для всех вершин $t'_{i,j,k} = t_{i,j,k} + \Delta\tau$;

Шаг 2. Переходим на самую позднюю вершину группы;

Шаг 3. Переходим в следующую смежную вершину по ребру наименьшей стоимости $c_{j,k}$;

Шаг 4. Корректируем $t'_{i,j,k} \rightarrow \max$, при условии $t'_{i,j,k} - t_{i,j,k} \leq \Delta\tau$ если для вершины существует заявка $e_{j,k} = 1$;

Шаг 5. Повторяем Шаги 3 и 4 пока остаются переходы;

Шаг 6. Переходим к Шагу 2 пока не пометим все вершины;

Шаг 7. Фиксируем для группы $V_{[costs],m,n}$.

Выбор между вариантами реализации второго этапа зависит от плотности заявок на участке (в выбранном регионе). При высокой

плотности следует минимизировать риски, в этом случае необходимо выбрать первый вариант срочного распределения. Однако, в этом случае возможны отказы от выполнения заявок и опоздания. При низкой плотности заявок лучше подходит второй вариант, так как он позволяет выполнить подключение для собственников при отсутствии заявок с целью оптимизации общей стоимости догазификации региона. На рисунке 2 показано отличие при реализации данных алгоритмов в количестве запланированных заявок в формируемом плане на газификацию.

Аналогичная логика будет полезна при имитационном моделировании изменения обстановки под влиянием внешних событий. Задержки и опоздания, нехватка человеческих и материальных ресурсов могут привести к смещению сроков влево для чего можно либо предусмотреть дополнительные интервалы времени, либо разработать графики опережения или компенсации возникающих отставаний.

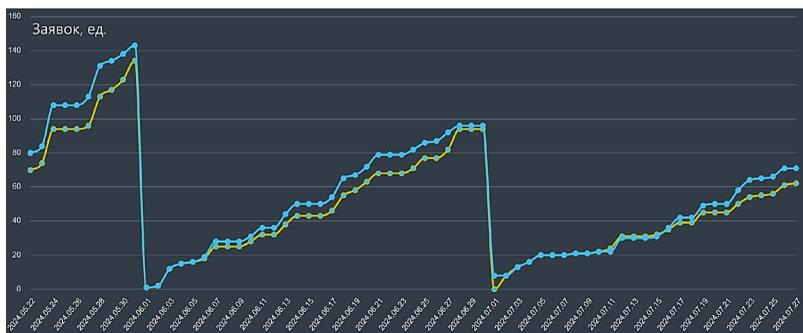


Рис. 2. План-график количества заявок на газификацию: желтый – вариант 1, бирюзовый – вариант 2

В предложенной модели это будет соответствовать появлению новых дополнительных ветвей обстановки, которые, с одной стороны, потребуют поиска дополнительной информации для их построения, а, с другой стороны, обеспечат заблаговременную проработку вариантов управленческих решений. Каждая ветвь будет иметь собственную частоту дискретизации, адаптивную к темпо-ритму событий.

Алгоритм планирования заявок в пространстве-времени может быть рекомендован для реализации в различных ситуационных центрах и системах мониторинга как в роли инструмента решения задач оптимизации, так и в качестве средства имитационного

моделирования возможных решений по оптимизации по времени использования географических распределенных ресурсов.

7. Практическая реализация. Предложенные решения были использованы в рамках внедрения цифровой платформы интегрального мониторинга (разработчик – ООО «Открытый код», г. Самара) для цифровой трансформации процессов сбора, анализа и визуализации данных коммунальных ресурсов [44]. Реализация предложенной модели потребовала проведения интеграции с источниками данных и функциональными пользователями цифровой платформы: региональным оператором газификации, эксплуатирующим собственную информационную систему с поддержкой механизма API, газораспределительными организациями региона, ведущими реестр газифицируемых объектов с использованием электронных таблиц, а также с информационными системами многофункциональных центров через Единую систему межведомственного электронного взаимодействия. Кроме того, для представления в модели данных от жителей потребовалось подключение к portalу Госуслуги с аутентификацией через Единую систему идентификации и аутентификации. Поскольку первичные данные не содержали в явном виде координат газифицируемых объектов, выполнялось прямое геокодирование текстовой адресной информации. Подключение к источникам данных осуществлялось с помощью встроенных в цифровую платформу интегрального мониторинга средств интеграции.

Интерфейс программного обеспечения цифровой платформы приведен на рисунке 3.

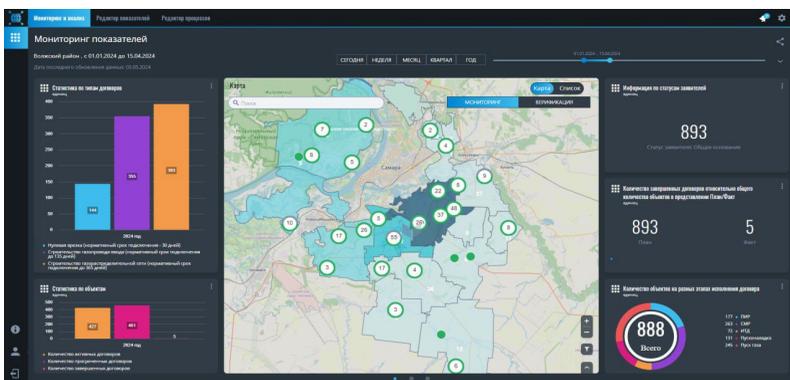


Рис. 3. Фрагмент графического интерфейса системы поддержки принятия решений по ресурсоснабжению населения на основе цифровой платформы интегрального мониторинга

В программе реализованы функциональные возможности геокодирования объектов на интерактивной карте, сбора, обработки и анализа данных по мероприятиям ресурсоснабжения; контроля исполнения полного жизненного цикла процессов по обеспечению населения коммунальными ресурсами; визуального отображения данных в режиме дашбордов и решения оптимизационных задач на основании агрегации данных.

Пользовательский интерфейс решения организован в форме интерактивной аналитической панели (дашборда), содержащей взаимно сопряженные графические приложения (виджеты), отражающие разные параметры развития обстановки. На электронной карте в центре экрана отображается геоинформационное пространство принятия решений с разбиением данных по информационным слоям. Отдельно выделены регионы обеспечения и точки спроса.

Применение предложенной модели позволяет не только пересмотреть способ формализации геоинформационных данных, но и по-новому организовать пользовательский интерфейс с учетом современных тенденций научной визуализации. С одной стороны, новые возможности включают конфигурируемость, интерактивность и адаптивность пользовательского интерфейса, с другой стороны, – они обеспечивают задание достаточно строгого и понятного пользователю регламента работы с данными, обеспечивающими результативность информационной поддержки принятия решений.

Последний тезис представляет собой важное преимущество для систем обработки информации и управления, построенных на базе геоинформационных систем. Проблема их использования на практике состоит в том, что они предоставляют пользователю избыточно большой объем данных и набор функциональных возможностей по их обработке, что затрудняет использование систем лицами, принимающим решения. Несколько решить проблему позволяет организационная мера по созданию вокруг геоинформационной системы аналитического центра, обеспечивающего лицо, принимающее решения, информационными справками и докладами, однако это серьезно усложняет и повышает стоимость внедрения платформы.

Для решения этой проблемы необходимо, как ни странно, сократить перечень возможностей системы и редуцировать набор отображаемых высшему руководству данных, обеспечив их интегральность и интерпретируемость для принятия управленческих решений. Такую возможность дает сценарный подход, когда для текущей ситуации вырабатывается несколько вариантов развития

обстановки, отличающихся разными внешними условиями. Например, может быть реализовано моделирование развития ситуации для позитивного, негативного и реалистичного сценария.

Предлагаемый подход позволяет реализовать краткосрочный прогноз изменения выбранных показателей во времени в соответствии с меняющейся обстановкой. При этом от руководителя – лица, принимающего решение, требуется выбор одного из нескольких вариантов, что реально реализовать в рамках ситуационного центра.

Общая концепция реализации цифровой платформы близка к современным системам класса Business Intelligence (BI). Как и BI системы, цифровая платформа интегрального мониторинга обеспечивает перевод транзакционной деловой информации в визуальную форму, удобную для восприятия человеком. Основные интерфейсы платформы по типу использования включают цифровую интерактивную карту (построенную на базе геоинформационной системы), масштабируемые графики и диаграммы, отображающие основные зависимости параметров между собой, а также прогнозы их изменения во времени.

Панели управления интерфейсом содержат наборы виджетов, описывающий по-отдельности каждую область мониторинга, а также сборные дашборды, соответствующие решаемым задачам или контролируемым ситуациям. Ситуационные наборы виджетов формируются динамически для конкретных решаемых задач и отображаются в верхней части пользовательского интерфейса. Таким образом, обеспечивается привлечение внимания пользователя к ключевым изменениям параметров и влияющим факторам, прогнозируя исход различных вариантов действий.

Комбинированная геоинформационная многослойная пространственно-временная модель позволяет подобрать масштаб отображаемой обстановки, как в территориальном, так и во временном аспекте, в соответствии с поставленной задачей и темпом изменения событий. Отметим, что в случае многопользовательского режима работы с цифровой платформой интегрального мониторинга, масштаб обстановки для каждого пользователя может быть разным, что обеспечивает согласование мнений в условиях различной осведомленности от отличий точек зрения.

Методика мониторинга обстановки в условиях использования предложенной модели состоит, таким образом, в последовательном выполнении семи действий или этапов: 1) отслеживание текущей ситуации; 2) корректировка оптимизационной задачи или постановка новой; 3) моделирование реалистичного решения задачи;

4) построение позитивного сценария и моделирование обстановки в его случае; 5) построение негативного сценария и моделирование обстановки в его случае; 6) формирование справки-отчета; 7) задание интервала контроля, по истечении которого все действия повторяются.

Предложенная методика позволила организовать сбор и обработку данных по обеспеченности населения коммунальными ресурсами на основе процессного подхода. Реализация возможностей бизнес-аналитики в предложенной модели позволила согласовать разные масштабы сбора и обработки информации в пространственном и временном аспектах на уровне подразделений коммунальных служб, аналитиков ситуационного центра и руководства региона в условиях высокой динамики изменения ситуации. В результате появилась возможность оптимизировать работы по обеспечению ресурсами в заданных временных ограничениях и в соответствии с отраслевыми регламентами.

В системе была предусмотрена возможность консолидации запросов на оказание услуг по ресурсоснабжению планирования работ по их комплексному исполнению. Применение предложенной модели в данной системе позволяет не только решить задачу оптимального планирования порядка исполнения заявок с учетом территориальной доступности и технологических возможностей сетей ресурсоснабжения, но и визуализировать информацию в рамках поддержки принятия решений по социально-экономическому развитию региона.

8. Заключение. Современные возможности геоинформационных технологий позволяют по-новому взглянуть на задачу организационного управления. Моделирование обстановки на карте с учетом динамики изменения событий становится мощным инструментом мониторинга, поскольку обеспечивает упорядочивание и согласование разнородной информации, поступающей из различных источников, и отражающей разные аспекты наблюдений. Реализация предложенной модели позволяет при этом перейти от мониторинга обстановки к поддержке принятия решений за счет реализации возможности моделирования различных сценариев развития обстановки и возможности решения оптимизационных задач.

Предложенная модель может быть рекомендована в качестве базиса для автоматизации поддержки принятия управленческих решений в системах бизнес-аналитики больших данных и ситуационных центрах. Опыт успешного ее применения в цифровой платформе интегрального мониторинга для аналитики и оптимизации ресурсоснабжения подтверждает правильность выбранного подхода.

Следует отметить, что непосредственное внедрение такого рода систем требует дополнительных усилий по их встраиванию в общий процесс сбора и обработки информации и выработки решений.

Дальнейшие исследования связаны с сопряжением предложенной модели с компонентами искусственного интеллекта для генерации слоев на базе нейросетевой кластеризации и классификации. Применение предложенной модели в этом случае позволяет решить важную задачу расширения объема обучающей выборки, накапливая данные не только по реальным обстановкам, но и по случаям негативного и позитивного развития событий, что обеспечивает необходимый и достаточный объем данных для решения задач классификации. Перспективным представляется также расширение области применения модели при решении широкого круга современных задач организационного управления.

Литература

1. Gospodinov S.G. Geoinformatics as a science of space // *European Journal of Technology and Design*. 2022. vol. 10(1). pp. 3–8.
2. Бескид П.П., Куракина Н.И., Орлова Н.В. Геоинформационные системы и технологии // СПб.: Российский государственный гидрометеорологический университет, 2010. 173 с.
3. Массер Д. Что есть пространство-время? // *В мире науки*. 2018. № 8-9. С. 78–82.
4. Rynasiewicz R. Newton's Views on Space, Time, and Motion / Ed.: Edward N. Zalta // *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*. 2012.
5. Ухтомский А.А. Доминанта // М.: АСТ, 2022. 320 с.
6. Флоренский П.А. Анализ пространственности и времени в художественно-изобразительных произведениях // М.: Прогресс, 1993. 324 с.
7. Мещеряков Б.Г., Зинченко В.П. Большой психологический словарь. Изд. 4-е, расш. // М.: АСТ, 2009. 811 с.
8. Бахтин М.М. Формы времени и хронотопа в романе. Очерки по исторической поэтике // *Литературно-критические статьи*. М.: Худ. лит., 1986. С. 121–290.
9. Корнилов С.В., Рыбникова Л.С., Рыбников П.А., Смирнов А.Ю. Геоинформационный мониторинг для решения экологических задач горнопромышленных территорий Среднего Урала // *Горная промышленность*. 2022. № S1. С. 127–133.
10. Имамов Ф.Н. Вахтеров А.Р., Решетников А.Г. Геоинформационная система для мониторинга и аналитического контроля локальных магнитных аномалий // *Молодежный Вестник УГАТУ*. 2021. № 1 (24). С. 17–24.
11. Цветков М.В., Смирнова О.В., Гальяно Ф.Р. Система мониторинга ледовой обстановки и обеспечения безопасного судоходства по северному морскому пути на базе интеллектуальной ГИС // *Труды СПИИРАН*. 2014. № 5(36). С. 28–43. DOI: 10.15622/sp.36.2.
12. Косяков С.В., Гадалов А.Б., Садыков А.М. Моделирование пространственных данных при решении задач дискретной оптимизации в среде ГИС // *Информационные технологии*. 2012. № 7. С. 27–31.
13. Воробьева Г.Р., Воробьев А.В., Орлов Г.О. Концепция обработки, анализа и визуализации геофизических данных на основе элементов тензорного исчисления // *Информатика и автоматизация*. 2024. Т. 23(2). С. 572–604.

14. Попович В.В., Ведешин Л.А. Понятие "пространство" в географических информационных системах // Системы высокой доступности. 2019. Т. 15. № 2. С. 47–56.
15. Кузьмин В.А., Шаныгин С.И., Чунин С.А., Никитин Г.С., Мкртчян М.Э., Каурова З.Г., Орехов Д.А., Цыганов А.В., Айдиев А.Б., Мищенко Н.В., Ачилов В.В. Моделирование пространственно-временных данных об окружающей среде в ГИС // Нормативно-правовое регулирование в ветеринарии. 2022. № 3. С. 43–50.
16. Рыжиков А.И. Картография, ГИС и время // Геодезия и картография. 2006. № 7. С. 43–47.
17. Маризе-Томокала Г.Де.Г., Сисей Ф.К. Данные дистанционного зондирования Земли // Научный Лидер. 2023. № 19(117). С. 21–33.
18. Куфтинова Н.Г. Проблемы интеллектуального анализа данных при моделировании транспортных потоков мегаполиса // Мир транспорта. 2020. Т. 18. № 5. С. 24–40.
19. Опоку Ф.К. Роль цифровых технологий в повышении безопасности и эффективности нефте- и газопроводов в России // Аллея науки. 2024. Т. 1. № 1(88).
20. de Lange N. Geoinformation Systems // Geoinformatics in Theory and Practice. 2023. pp. 375–433. DOI: 10.1007/978-3-662-65758-4_9.
21. Merry K., Bettinger P., Crosby M., Boston K. Geographic information systems // Geographic Information System Skills for Foresters and Natural Resource Managers. 2023. pp. 1–23. DOI: 10.1016/B978-0-323-90519-0.00007-8.
22. Yuan M. Relationships between Space and Time // Geographic Information Science & Technology Body of Knowledge. 2020. DOI: 10.22224/gistbok/2020.3.7.
23. Yuan M. From representation to geocomputation: some theoretical accounts of geographic information science // New Thinking in GIScience. 2022. pp. 1–8.
24. Dodge S., Su R., Johnson J., Simcharoen A., Goulias K., Smith J.L.D., Ahearn S.C. ORTEGA: An object-oriented time-geographic analytical approach to trace space-time contact patterns in movement data // Computers, Environment and Urban Systems. 2021. vol. 88. DOI: 10.1016/j.compenvurbsys.2021.101630.
25. van Gasselst S., Nass A. Time and geology in geographic information systems: some formalism for describing temporal events // Journal for Geographic Information Science. 2015. vol. 3. pp. 199–208. DOI: 10.1553/giscience2015s199.
26. Shields R. Bergson's GIS: experience, time and memory in geographical information systems // Media Theory. Geospatial Memory. 2018. vol. 2(1). pp. 316–332.
27. Ott T., Swiaczny F. Implementation of time in GIS // Time-Integrative Geographic Information Systems. 2001. pp. 77–126. DOI: 10.1007/978-3-642-56747-6_4.
28. Dai J., An L. 1.21 –Time geography // Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences. Comprehensive Geographic Information Systems. 2017. pp. 303–312. DOI: 10.1016/B978-0-12-409548-9.09625-1.
29. Claramunt C., Thériault M. Managing time in GIS: an event-oriented approach // Recent Advances in Temporal Databases, Proceedings of the International Workshop on Temporal Databases. 1995. pp. 23–42. DOI: 10.1007/978-1-4471-3033-8_2.
30. Wang M., Zhang J., Cao Y., Li S., Chen M. A study on a spatiotemporal entity-based event data model // ISPRS International Journal of Geo-Information. 2024. vol. 13(10). DOI: 10.3390/ijgi13100360.
31. Домрачева А.А., Сайбель Н.Ю. Применение геоинформационных систем в бизнес-анализе // Взаимодействие науки и общества: проблемы и перспективы. 2016. С. 73–75.

32. Chaudhuri S. Application of web-based geographical information system (GIS) in e-business // *Digital Marketing and Consumer Engagement: Concepts, Methodologies, Tools, and Applications*. IGI Global, 2018. pp. 649–665.
33. Кормен Т., Лейзерсон Ч., Ривест Р., Штайн К. Алгоритмы: построение и анализ // пер. с англ. М.: Вильямс, 2019. 1296 с.
34. Кристофидес Н. Теория графов. Алгоритмический подход // М.: Мир, 1978. 434 с.
35. Воробьев А.В., Воробьева Г.Р. Подход к динамической визуализации разнородных геопространственных векторных изображений // *Компьютерная оптика*. 2024. Т. 48. № 1. С. 123–138.
36. Плякин А.В., Орехова Е.А., Огарков Д.И. Геоинформационные системы для обеспечения транспортно-логистической деятельности // *Интеллектуальная логистика*. 2021. С. 149–153.
37. Оюунханд Б., Касьянова Е.Л. Использование ДЗЗ и ГИС при создании географических основ для тематических карт // *Вестник СГУГиТ*. 2021. Т. 26. № 5. С. 119–125.
38. Sowmiya Narayanan K.J., Manimaran A. Recent developments in geographic information systems across different application domains: a review // *Knowledge and Information Systems*. 2024. vol. 66. pp. 1523–1547.
39. Jelokhani-Niaraki M., Moradi-Pour S., Samany N.N., Mohammadkhan S. A multiple models-multiple users group GIS-based decision support system for land use problems // *Land Use Policy*, 2023. vol. 134. DOI: 10.1016/j.landusepol.2023.106916.
40. Wang D. Research and development of intelligent decision support system for distribution network planning based on GIS // *IEEE 3rd International Conference on Data Science and Computer Application (ICDSCA)*. 2023. pp. 786–791.
41. Прохоров С.А. Прикладной анализ неэквидистантных временных рядов. Самара: СГАУ, 2001. 375 с.
42. Сурнин О.Л., Ситников П.В., Иващенко А.В., Головнин О.К., Дубинина И.Н., Додонова Е.А. Применение цифровой платформы интегрального мониторинга как средства бизнес-аналитики социально-экономического развития региона // Конференция «Информационные технологии в управлении» (ИТУ-2022). Сборник материалов. СПб.: СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2022. С. 158–161.
43. Ivaschenko A., Dubinina I., Golovnin O., Golovnina A., Sitnikov P. Digital integrated monitoring platform for intelligent social analysis // *Communications in Computer and Information Science*. Springer, Cham. 2023. vol. 1909. pp. 365–376. DOI: 10.1007/978-3-031-44615-3_25.
44. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023616797 РФ. Цифровая платформа интегрального мониторинга ресурсоснабжения: № 2023614655: заявл. 14.03.2023: опубл. 03.04.2023 / заявитель ООО «Открытый код».

Иващенко Антон Владимирович — д-р техн. наук, профессор, директор, передовая медицинская инженерная школа, Самарский государственный медицинский университет Министерства здравоохранения Российской Федерации. Область научных интересов: управление в организационных системах, мультиагентные технологии, медицинская инженерия. Число научных публикаций — 400. anton.ivashenko@gmail.com; улица Чапаевская, 89, 443099, Самара, Россия; р.т.: +7(846)374-1004.

Головнин Олег Константинович — д-р техн. наук, доцент, заведующий кафедрой, кафедра медицинской физики, математики и информатики, Самарский государственный медицинский университет Министерства здравоохранения Российской Федерации. Область научных интересов: системный анализ, геоинформационные системы,

интеллектуальные транспортные системы. Число научных публикаций — 250. golovnin@bk.ru; улица Чапаевская, 89, 443099, Самара, Россия; р.т.: +7(846)374-1004.

Головнина Анастасия Александровна — канд. техн. наук, доцент кафедры, кафедра информационных систем и технологий, Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева. Область научных интересов: системный анализ, геоинформационные системы, искусственный интеллект, обработка больших данных. Число научных публикаций — 85. anastasiya.stolbova@bk.ru; Московское шоссе, 34, 443086, Самара, Россия; р.т.: +7(846)267-4370.

Додонова Евгения Александровна — аспирант, передовая медицинская инженерная школа, Самарский государственный медицинский университет Министерства здравоохранения Российской Федерации. Область научных интересов: управление в организационных системах, мультиагентные технологии, медицинская инженерия. Число научных публикаций — 20. dodonova.evg@gmail.com; улица Чапаевская, 89, 443099, Самара, Россия; р.т.: +7(846)374-1004.

A. IVASCHENKO, O. GOLOVNIN, A. GOLOVNINA, E. DODONOVA
**AN ASSEMBLED MODEL OF MULTILAYER GEOINFORMATION
SPACE-TIME**

Ivaschenko A., Golovnin O., Golovnina A., Dodonova E. An Assembled Model of Multilayer Geoinformation Space-Time.

Abstract. Modern organizational management technologies involve collecting and processing large amounts of data to calculate the parameters of the functioning of the objects and processes under study. Since the main feature of the collected parameters is their binding to territories, on the one hand, and attribution to time periods, on the other hand, the use of geographic information systems and technologies is required. Despite the development of modern geographic information technologies, the issues of their practical application to support decision-making, taking into account the combined influence of spatial and temporal factors, have not been fully resolved. The article proposes an assembled model of geoinformation multilayer space-time, which is a graph whose vertices are the parameter values ordered by layers with the placement of time marks in the time layer, and the arcs describe the relations between them that are divided into three types: topological, semantic and chronological. Conjugation and ordering of parameters, according to the proposed model, allows you to correctly pose and solve the optimization problem, and, consequently, eliminate the problem of the practical use of accumulated analytics in the processes of supporting management decision-making. The proposed model is used in the digital platform of integral monitoring for the digital transformation of the processes of collecting, analyzing and visualizing utility resource data. The general management task is considered, and a specific example is given for one of the urgent tasks of regional management, i.e. social gasification, in which the optimization of the process of processing applications for connecting residential buildings to the gas supply system within the boundaries of the selected region is carried out. The assembled model of geoinformation multilayer space-time allows formulating universal statements of decision support problems for various geoinformatics applications in logistics, transport resource management, as well as in situational centers for enterprise and regional management, business analytics systems and organizational systems management.

Keywords: geographic information system, geographic information model, spatial model, spatio-temporal model, spatial optimization, integral monitoring, GIS.

References

1. Gospodinov S.G. Geoinformatics as a science of space. *European Journal of Technology and Design*. 2022. vol. 10(1). pp. 3–8.
2. Beskid P.P., Kurakina N.I., Orlova N.V. *Geoinformacionnye sistemy i tehnologii [Geographic information systems and technologies]*. Saint Peterburg: Rossijskij gosudarstvennyj gidrometeorologicheskij universitet, 2013. 173 p. (In Russ.).
3. Masser D. [What is space-time?]. *V mire nauki – In the world of science*. 2018. no. 8-9. pp. 78–82. (In Russ.).
4. Rynasiewicz R. *Newton's Views on Space, Time, and Motion / Ed.: Edward N. Zalta. The Stanford Encyclopedia of Philosophy*. 2012.
5. Uhtomskij A.A. *Dominanta [Dominant]*. Moscow: AST, 2022. 320 p. (In Russ.).
6. Florenskij P.A. *Analiz prostranstvennosti i vremeni v hudozhestvenno-izobrazitel'nyh proizvedenijah [Analysis of spatiality and time in artistic and visual works]*. Moscow, Progress, 1993. 324 p (In Russ.).

7. Meshherjakova B.G., Zinchenko V.P. Bol'shoj psihologicheskij slovar' [Large psychological dictionary]. Moscow: AST, 2009. 811 p. (In Russ.).
8. Bahtin M.M. [Forms of Time and Chronotope in the Novel. Essays on Historical Poetics]. Literaturno-kriticheskie stat'i – Literary and critical articles. 1986. pp. 121–290. (In Russ.).
9. [Geoinformation monitoring for solving environmental problems of mining areas of the Middle Urals]. Gornaja promyshlennost' – Mining industry. 2022. no. S1. pp. 127–133. (In Russ.).
10. Imamov F.N., Vahterov A.R., Reshetnikov A.G. [Geoinformation system for monitoring and analytical control of local magnetic anomalies]. Molodezhnyj Vestnik UGATU – UGATU Youth Bulletin. 2021. no. 1(24). pp. 17–24. (In Russ.).
11. Tsvetkov M., Smirnova O., Galiano P. [Ice Situation and Safe Navigation Monitoring System on the Northern Sea Route Based on Intelligent GIS]. Trudy SPIIRAN – SPIIRAS Proceedings. 2014. no. 5(36). pp. 28–43. DOI: 10.15622/sp.36.2. (In Russ.).
12. Kosyakov S.V., Gadalov A.B., Sadykov A.M. [Modeling spatial data in solving discrete optimization problems in a GIS environment]. Informacionnye tekhnologii – Information technology. 2012. no. 7. pp. 27–31. (In Russ.).
13. Vorobeva G., Vorobev A., Orlov G. [The Concept of Processing, Analysis and Visualization of Geophysical Data Based on Elements of Tensor Calculus]. Informatika i avtomatizaciya – Informatics and Automation. 2024. vol. 23(2). pp. 572–604. (In Russ.).
14. Popovich V.V., Vedeshin L.A. [The concept of "space" in geographic information systems]. Sistemy vysokoj dostupnosti – High availability systems. 2019. vol. 15. no. 2. pp. 47–56. (In Russ.).
15. Kuz'min V.A., SHanygin S.I., Chunin S.A., Nikitin G.S., Mkrtychyan M.E., Kaurova Z.G., Orekhov D.A., Cyganov A.V., Ajdiev A.B., Mishchenko N.V., Achilov V.V. [Modeling of spatio-temporal environmental data in GIS]. Normativno-pravovoe regulirovanie v veterinarii – Regulatory and legal regulation in veterinary medicine. 2022. no. 3. pp. 43–50. (In Russ.).
16. Ryzhikov A.I. [Cartography, GIS and time]. Geodeziya i kartografiya. 2006. no. 7. pp. 43–47. (In Russ.).
17. Marize-Tomokala G.De.G., Sisej F.K. [Earth remote sensing data]. Nauchnyj Lider – Scientific Leader. 2023. no. 19(117). pp. 21–33. (In Russ.).
18. Kuftinova N.G. [Problems of data mining in modeling metropolitan transport flows]. Mir transporta – The world of transport. 2020. vol. 18. no. 5. pp. 24–40. (In Russ.).
19. Opoku F.K. [The role of digital technologies in improving the safety and efficiency of oil and gas pipelines in Russia]. Alleya nauki – Alley of Science. 2024. vol. 1. no. 1(88). (In Russ.).
20. de Lange N. Geoinformation Systems. Geoinformatics in Theory and Practice. 2023. pp. 375–433. DOI: 10.1007/978-3-662-65758-4_9.
21. Merry K., Bettinger P., Crosby M., Boston K. Geographic information systems. Geographic Information System Skills for Foresters and Natural Resource Managers. 2023. pp. 1–23. DOI: 10.1016/B978-0-323-90519-0.00007-8.
22. Yuan M. Relationships between Space and Time. Geographic Information Science & Technology Body of Knowledge. 2020. DOI: 10.22224/gistbok/2020.3.7.
23. Yuan M. From representation to geocomputation: some theoretical accounts of geographic information science. New Thinking in GIScience. 2022. pp. 1–8.
24. Dodge S., Su R., Johnson J., Simcharoen A., Goulias K., Smith J.L.D., Ahearn S.C. ORTEGA: An object-oriented time-geographic analytical approach to trace space-time contact patterns in movement data. Computers, Environment and Urban Systems. 2021. vol. 88. DOI: 10.1016/j.compenvurbsys.2021.101630.

25. van Gasselt S., Nass A. Time and geology in geographic information systems: some formalism for describing temporal events. *Journal for Geographic Information Science*. 2015. vol. 3. pp. 199–208. DOI: 10.1553/giscience2015s199.
26. Shields R. Bergson's GIS: experience, time and memory in geographical information systems. *Media Theory. Geospatial Memory*. 2018. vol. 2(1). pp. 316–332.
27. Ott T., Swiaczyn F. Implementation of time in GIS. *Time-Integrative Geographic Information Systems*. 2001. pp. 77–126. DOI: 10.1007/978-3-642-56747-6_4.
28. Dai J., An L. 1.21 –Time geography. *Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences. Comprehensive Geographic Information Systems*. 2017. pp. 303–312. DOI: 10.1016/B978-0-12-409548-9.09625-1.
29. Claramunt C., Thériault M. Managing time in GIS: an event-oriented approach. *Recent Advances in Temporal Databases, Proceedings of the International Workshop on Temporal Databases*. 1995. pp. 23–42. DOI: 10.1007/978-1-4471-3033-8_2.
30. Wang M., Zhang J., Cao Y., Li S., Chen M. A study on a spatiotemporal entity-based event data model. *ISPRS International Journal of Geo-Information*. 2024. vol. 13(10). DOI: 10.3390/ijgi13100360.
31. Domracheva A.A., Sajbel' N.Ju. [Application of Geographic Information Systems in Business Analysis]. *Vzaimodejstvie nauki i obshchestva: problemy i perspektivy – Interaction between science and society: problems and prospects*. 2016. pp. 73–75. (In Russ.).
32. Chaudhuri S. Application of web-based geographical information system (GIS) in e-business. *Digital Marketing and Consumer Engagement: Concepts, Methodologies, Tools, and Applications*. IGI Global, 2018. pp. 649–665.
33. Kormen T., Lejzerson Ch., Rivest R., Shtajn K. *Algoritmy: postroenie i analiz [Algorithms: construction and analysis]*. Moscow, Vil'jams, 2019, 1296 p. (In Russ.).
34. Kristofides N. *Teoriya grafov. Algoritmicheskij podhod [Graph Theory. Algorithmic Approach]*. Moscow, Mir, 1978, 434 p. (In Russ.).
35. Vorob'ev A.V., Vorob'eva G.R. [An approach to dynamic visualization of heterogeneous geospatial vector images]. *Komp'yuternaja optika – Computer Optics*. 2024. vol. 48. no. 1. pp. 123–138. (In Russ.).
36. Pljakin A.V., Orehova E.A., Ogarkov D.I. [Geographic information systems for transport and logistics activities]. *Intellektual'naja logistika – Intelligent logistics*. 2021. pp. 149–153. (In Russ.).
37. Ojuunhand B., Kas'janova E.L. [Using Remote Sensing and GIS to Create Geographical Bases for Thematic Maps]. *Bulletin of the SGUGiT Vestnik SGUGiT*. 2021. vol. 26. no. 5. pp. 119–125. (In Russ.).
38. Sowmiya Narayanan K.J., Manimaran A. Recent developments in geographic information systems across different application domains: a review. *Knowledge and Information Systems*. 2024. vol. 66. pp. 1523–1547.
39. Jelokhani-Niaraki M., Moradi-Pour S., Samany N.N., Mohammadkhan S. A multiple models-multiple users group GIS-based decision support system for land use problems. *Land Use Policy*, 2023. vol. 134. DOI: 10.1016/j.landusepol.2023.106916.
40. Wang D. Research and development of intelligent decision support system for distribution network planning based on GIS. *IEEE 3rd International Conference on Data Science and Computer Application (ICDSCA)*. 2023. pp. 786–791.
41. Prokhorov S.A. *Prikladnoj analiz neekvidistantny'x vremenny'x ryadov [Applied analysis of non-equidistant time series]*. Samara, Samara State Aerospace University, 2001. 375 p. (In Russ.).
42. Surmin O.L., Sitnikov P.V., Ivashhenko A.V., Golovnin O.K., Dubinina I.N., Dodonova E.A. *Primenenie cifrovoj platformy integral'nogo monitoringa kak sredstva biznes-analitiki social'no-jekonomicheskogo razvitiya regiona [Application of a digital platform for integrated monitoring as a means of business analytics of the socio-*

- economic development of a region] Konferencija «Informacionnye tehnologii v upravlenii» (ITU-2022). Sbornik materialov [Conference "Information Technologies in Management" (ITU-2022). Collection of materials]. SPb.: SPbGJeTU «LJeTb», 2022. pp. 158–161. (In Russ.).
43. Ivaschenko A., Dubinina I., Golovnin O., Golovnina A., Sitnikov P. Digital integrated monitoring platform for intelligent social analysis. Communications in Computer and Information Science. Springer, Cham. 2023. vol. 1909. pp. 365–376. DOI: 10.1007/978-3-031-44615-3_25.
44. Cifrovaja platforma integral'nogo monitoringa resursosnabzhenija [Digital platform for integrated resource supply monitoring]. Russian patent no. 2023616797, 2023. (In Russ.).

Ivaschenko Anton — Ph.D., Dr.Sci., Professor, Director, Higher school of medical engineering, Samara State Medical University. Research interests: management in organizational systems, multi-agent technologies, medical engineering. The number of publications — 400. anton.ivashenko@gmail.com; 89, Chapaevskaya St., 443099, Samara, Russia; office phone: +7(846)374-1004.

Golovnin Oleg — Ph.D., Dr.Sci., Associate Professor, Head of the department, Head of the department of medical physics, mathematics and informatics, Samara State Medical University. Research interests: systems analysis, geographic information systems, intelligent transport systems. The number of publications — 250. golovnin@bk.ru; 89, Chapaevskaya St., 443099, Samara, Russia; office phone: +7(846)374-1004.

Golovnina Anastasia — Ph.D., Associate professor of the department, Department of information systems and technologies, Samara National Research University. Research interests: systems analysis, geographic information systems, artificial intelligence, big data processing. The number of publications — 85. anastasiya.stolbova@bk.ru; 34, Moskovskoe Hwy., 443086, Samara, Russia; office phone: +7(846)267-4370.

Dodonova Evgeniya — Postgraduate student, Higher school of medical engineering, Samara State Medical University. Research interests: management in organizational systems, multi-agent technologies, medical engineering. The number of publications — 20. dodonova.evg@gmail.com; 89, Chapaevskaya St., 443099, Samara, Russia; office phone: +7(846)374-1004.