

УДК 658.7:681.3.06

© С.Л. Беляков, М.Л. Белякова, М.Н. Савельева

С.Л. Беляков, М.Л. Белякова, М.Н. Савельева

ГЕОИНФОРМАЦИОННЫЕ МОДЕЛИ В ПРОЕКТИРОВАНИИ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ МАТЕРИАЛЬНЫМИ ПОТОКАМИ

Введение

Управление материальными потоками является важным компонентом системы производства и потребления материальных продуктов. Добыча и транспортировка сырья, производство, поставка готовых изделий и их утилизация порождают материальные потоки различной природы. Любой поток является реализацией логистического проекта, управление которым осуществляет диспетчер-логист. Особенностью систем рассматриваемого типа является то, что значительная доля их элементов тесно связана с природной средой. Любой поток реализуется в транспортной системе, испытывающей влияние реального мира, поэтому при управлении материальными потоками используют геоинформационные модели как средство оптимизации структуры и планирования работы в условиях непрерывных изменений внешней среды.

Информационная поддержка процесса разработки системы материальных потоков должна заключаться в получении традиционных для ГИС ответов на вопросы [1, 2]:

- каков эффект от применения решений ранее реализованного проекта в настоящее время;
- как поведет себя ранее принятое решение в том же месте пространства в будущем;
- каковы особенности известной ситуации, возникшей в другом месте;
- каковы последствия использования апробированного решения, если оно будет применено в другом проекте;
- что даст попытка применить апробированные решения, которые напрямую не относятся к новому проекту.

Целью применения геоинформационных моделей при создании проекта материальных потоков является выработка решений по выбору пространственных областей для выполнения логистических операций над потоками и направления их распространения в транспортной сети. От достоверности геоинформационной модели существенно зависит качество принятых решений, уровень риска возникновения ущерба.

Под достоверностью геоинформационной модели будем понимать степень соответствия результата

моделирования состоянию той области реального мира, в которой предполагается применить этот результат. Модель должна описывать реально осуществимый вариант материального потока. Добиться на практике полной достоверности результата не удастся по ряду объективных причин, обусловленных неполнотой, неточностью и неоднозначностью информации о поведении внешней среды. Поэтому особое значение при проектировании приобретает использование опыта принятия решений в аналогичных ситуациях. Наблюдение и анализ конкретных событий, объектов и отношений в процессе управления материальным потоком позволяет значительно повысить достоверность моделей. Сделанные при этом обобщения полезны тем, что дают возможность с достаточно высокой уверенностью прогнозировать изменение ситуаций и решений в будущем. Без прогнозирования реализация принятых решений невозможна: состояние внешней среды никогда не остается неизменными, заставляя корректировать апробированные ранее решения. Это делает актуальной задачу поиска новых концепций построения геоинформационных моделей, аккумулирующих в себе аналитический опыт принятия решений.

В настоящей работе анализируются структурные особенности геоинформационных моделей и процедур повторного использования опыта, направленные на генерацию достоверных решений.

Подходы к построению геоинформационных моделей

Традиционно геоинформационные модели строятся как картографическое представление анализируемой области [3]. Опыт реализации проектов системы материальных потоков в этом случае отображается схемами и тематическими слоями, наложенными на картографическую основу. Попытка использовать при разработке новых проектов представленный таким образом опыт наталкивается на трудности в построении достоверных выводов о применении ранее принятых решений. Ошибки проявляются двояким образом:

- известное решение безосновательно экстраполируется в другую пространственно-

временную область. Особенностью рассматриваемого класса систем является сильная зависимость поведения материальных потоков от места и времени. Например, проект поставки удобрений, реализованный в летнее время в сельской местности, дает неудовлетворительный результат в случае его применения в той же местности в зимний период. Причина в отсутствии данных об изменении ситуаций и решений;

- новое решение строится на основе кажущегося сходства с ранее осуществленными проектами. Похожесть картографического отображения может порождать правдоподобные, но недостоверные выводы и приводить к ошибке в принятии решения. Например, перегрузка конвейерной системы транспортировки багажа в аэропорту имеет принципиально разные по смыслу последствия в сравнении с перегрузкой вагонов железнодорожного состава. Решения о мерах подстраховки на случай перегрузки принципиально различны и не могут применяться одинаково в обеих ситуациях. Причина ошибки в игнорировании смыслового наполнения опыта, не отображенного на карте.

Геоинформационные модели могут строиться с ориентацией на применение специализированных функций пространственного анализа и бизнес-аналитики ГИС [4, 5]. Информационная структура модели в этом случае должна явно предоставлять функциям необходимые данные, что указывается в описании функций. Как показало изучение программного инструментария современных ГИС, оценка смысловой близости ситуаций, генерация картографического представления решений и оценка их достоверности не реализуются, а соответствующих требований к структуре модели не выдвигается.

Другим подходом к построению геоинформационных моделей является использование знаний и концептуальное моделирование [6, 7]. Недостатком подхода следует считать отсутствие картографической визуализации знаний и концепций. Субъективные аналитические выводы экспертов, с нашей точки зрения, должны находить соответствующее визуальное отображение на карте рабочей области проекта. Картографическая визуализация позволит не только единым образом применить инструменты геоинформационных систем для данных и знаний, но и повысить качество знаний, получаемых от эксперта [8].

Геоинформационные модели и аналитический опыт

Выделим отличительные особенности геоинформационных моделей, включающих в себя

аналитический опыт наблюдения. Для этого рассмотрим структуру геоинформационной модели, описывающей материальный поток. Материальный поток представим моделью

$$\langle S_L, P_S, T \rangle,$$

в которой S_L представляет собой множество пространственно локализованных логистических центров, P_S – множество транспортных маршрутов (связей) между логистическими центрами, T – расписание доставки груза в пункт назначения. Под логистическим центром понимается место выполнения логистических операций над грузом (упаковка, распаковка, погрузка, разгрузка, сортировка, переработка и т.д.). Под геоинформационной моделью будем понимать множество

$$M = \langle W, F \rangle,$$

где W является множеством картографических элементов, представляющих анализируемую область карты, F – множеством функций обработки картографических элементов. Внутренняя структура модели такова:

$$W = \langle W_B, W_{SL}, W_{PS}, W_T \rangle, \\ F = \langle F_B, F_S \rangle.$$

Здесь картографические объекты W_B представляют базовую картографическую основу, W_{SL} – логистические центры, W_{PS} – траекторию транспортировки, W_T – временные диаграммы потока. Картографические объекты размещены на слоях карты и связаны ссылками с внешними базами данных. Через F_B обозначен базовый набор аналитических функций геоинформационной системы, через F_S – набор специальных функций анализа.

Перспективным подходом к формированию достоверных решений представляется построение геоинформационных моделей образного представления опыта [9]. Главными особенностями подхода являются:

- описание ситуаций и решений с позиции их возможных преобразований, не изменяющих сути;
- использование специальной логики оценки близости ситуаций, моделирующей образное мышление человека;
- генерация в картографическом виде решений, достоверность которых высока благодаря использованию опыта.

Применение данного подхода к построению геоинформационных моделей рассматриваемого класса задач требует разработки процедур отображения ситуаций и решений в заданные пространственно-временные границы, оценки достоверности указанных операций с учетом особенностей картографического представления.

Расширение геоинформационной модели для использования аналитического опыта состоит в дополнении ее новыми компонентами W_I и F_I :

$$\begin{aligned} W &= \langle W_B, W_{SL}, W_{PS}, W_T, W_I \rangle, \\ F &= \langle F_B, F_S, F_I \rangle. \end{aligned} \quad (1)$$

Через W_I обозначено множество картографических объектов, описывающих образы логистических проектов, через F_I – множество процедур обработки образов.

В процессе проектирования системы материальных потоков геоинформационные модели используются следующим образом:

1) строится геоинформационная модель проектируемой системы (m_p), структура которой соответствует (1). Разработчик описывает образный компонент W_p , который задает смысловое содержание проекта;

2) с помощью функции сравнения образов из множества F_I находится наиболее близкая по смыслу модель $m_{(i)} \in \{m^{(0)}, m^{(1)}, \dots, m^{(n)}\}$ из множества проверенных опытом моделей проектов $\{m^{(n)}\}$, $n > 0$;

3) на основе модели $m^{(i)}$ синтезируется решение для модели m_p и оценивается достоверность полученного результата. Решением считаются компоненты W_{SL} , W_{PS} , W_T , отображающие траекторию потока, размещение логистических центров и временную диаграмму перемещения элементов потока. Если уровень достоверности достаточен, синтезированное решение принимается и выполняется переход к пункту 4, в противном случае модель $m^{(i)}$ исключается из $\{m^{(n)}\}$. Если множество не пусто, то выполняется переход к пункту 2. В противном случае констатируется недостаток опыта и невозможность оценить проектное решение;

4) оценивается эффективность синтезированного решения. Если эффективность недостаточна, корректируют модель m_p и переходят к пункту 2, в противном случае принятое проектное решение считается удовлетворительным.

Предложенная структура геоинформационной модели (1) дает качественно новую возможность использовать аналитический опыт в п. 2 приведенной последовательности действий. Рассмотрим, при каких условиях может быть достигнут эффект.

Оценивание достоверности

Для рассматриваемого класса задач достоверность проекта материального потока оценивается как возможность осуществить этот проект в реальном мире. Осуществить проект – значит разместить логистические центры S_L , определить пути P_S в транспортной сети и установить расписание перемещения T . Поскольку карта геоинформационной системы

является моделью реального мира, то естественно предположить, что геоинформационная модель проекта, согласованная с картой, отображает достоверно реализуемый проект.

Рассмотрим формальные условия достоверности модели. Будем считать, что в ГИС описаны правила согласованности (корректности) картографического представления. Подобные правила используют в картографическом производстве и реализуют программами [10]. Если обозначить через R логическую функцию определения корректности, то геоинформационная модель m согласована, если истинны все правила ($R(m) = true$), в противном случае $R(m) = false$. В системах, накапливающих опыт, представленный геоинформационными моделями, должно выполняться очевидное условие:

$$\forall m^{(i)} \in \{m^{(n)}\}, i \geq 0 : R(m^{(i)}) = true.$$

Однако при повторном использовании опыта это условие может нарушаться. Причина заключается в естественной модификации базовой картографической основы, отражающей изменения в реальном мире. Если попытаться перенести ранее использованный проект в другие условия, то может возникнуть несогласованность с картой. Формально, если модель $m^{(i)}$, отображенная на базовой картографической основе $W_B(m^{(i)})$, трансформируется в модель $\bar{m}^{(i)}$ на модифицированной базовой картографической основе $W_B\bar{m}^{(i)}$, условием достоверности модели $\bar{m}^{(i)}$ является

$$A(\bar{m}^{(i)}) = (W_B(\bar{m}^{(i)}) \neq W_B(m^{(i)})) \& R(\bar{m}^{(i)}) = true. \quad (2)$$

Анализ выражения (2) приводит к следующим выводам:

- недостоверный результат дает попытка трансформировать известный проект в новый вариант $\bar{m}^{(i)}$ при тех же условиях реального мира ($W_B(\bar{m}^{(i)}) = W_B(m^{(i)})$). Иными словами, полученный опыт является единственным источником построения новых решений и не подлежит пересмотру;
- чтобы оценить достоверность ситуации или решения, наблюдавшихся ранее, необходимо построить их модели на изменившейся базовой картографической основе. Изменения коснутся не только пространственных, но временных и семантических данных. Обобщенным условием достоверности при этом остается корректность картографического отображения в ГИС;
- процедура переноса опыта обладает неустойчивостью. Причиной несогласованности, введенной из опыта модели $\bar{m}^{(i)}$, может оказаться

некорректность хотя бы одного из ее элементов. Соответственно, чем больше элементов включает в себя модель, тем ниже вероятность получения достоверного результата. По этой причине процесс принятия решения в целом приобретает характер, при котором даже значительный объем накопленных данных не позволит строить достоверные решения.

Сделанные выводы указывают на полезность использования образного описания геоинформационных моделей для синтеза решений с высоким уровнем достоверности. Такой подход основан на том, что реализуемость проекта определяется его возможными преобразованиями. Наличие преобразований делает процесс генерации решений более робастным.

Рассмотрим формализм для оценки достоверности геоинформационной модели, трансформированной в новую область с другими значениями пространственно-временных и семантических параметров. Если

$$m = \langle c, h_1(c), h_2(c), \dots, h_M(c) \rangle$$

образ модели m , представленной центром c и набором его преобразований $h_1(c), h_2(c), \dots, h_M(c)$, то трансформация модели описывается в виде

$$\bar{m} = H(m, \bar{c}),$$

где H – процедура трансформирования, $\bar{c}$ – центр новой модели $\bar{m}$. Любая образная модель имеет центр, под которым понимается реально наблюдавшийся факт [9]. Центр трансформированной модели задается пользователем-аналитиком. Процедуру H будем называть далее процедурой метатрансформирования, поскольку ее действие распространяется на преобразования исходной геоинформационной модели и представляет концептуально более высокий уровень преобразований. Так как каждое преобразование $h_i(c)$ является картографическим объектом, метатрансформирование заключается в построении новых картографических объектов, которые составляют модель $\bar{m}$. В качестве примера на рис. 1 показана геоинформационная модель ранее выполненного проекта перевозки груза из точки **A** через точки **C** и **B** в точку **D**. Центром образа ситуации являются точки **A**, **B**, **C** и **D**. На рис. 2 показан образ решения, в котором преобразования местоположения логистических центров, не меняющие сути решения, представлены площадными объектами $s(A)$, $s(B)$, $s(C)$ и $s(D)$, а траектория транспортировки показана сплошной линией. Возможные преобразования траектории P_1 , P_2 и P_3 , также не изменяющие сути решения, отображены пунктирными линиями. На рис. 3 показана схема нового проекта транспортировки из точки **E** через точки **F** и **G** в точку **H**.

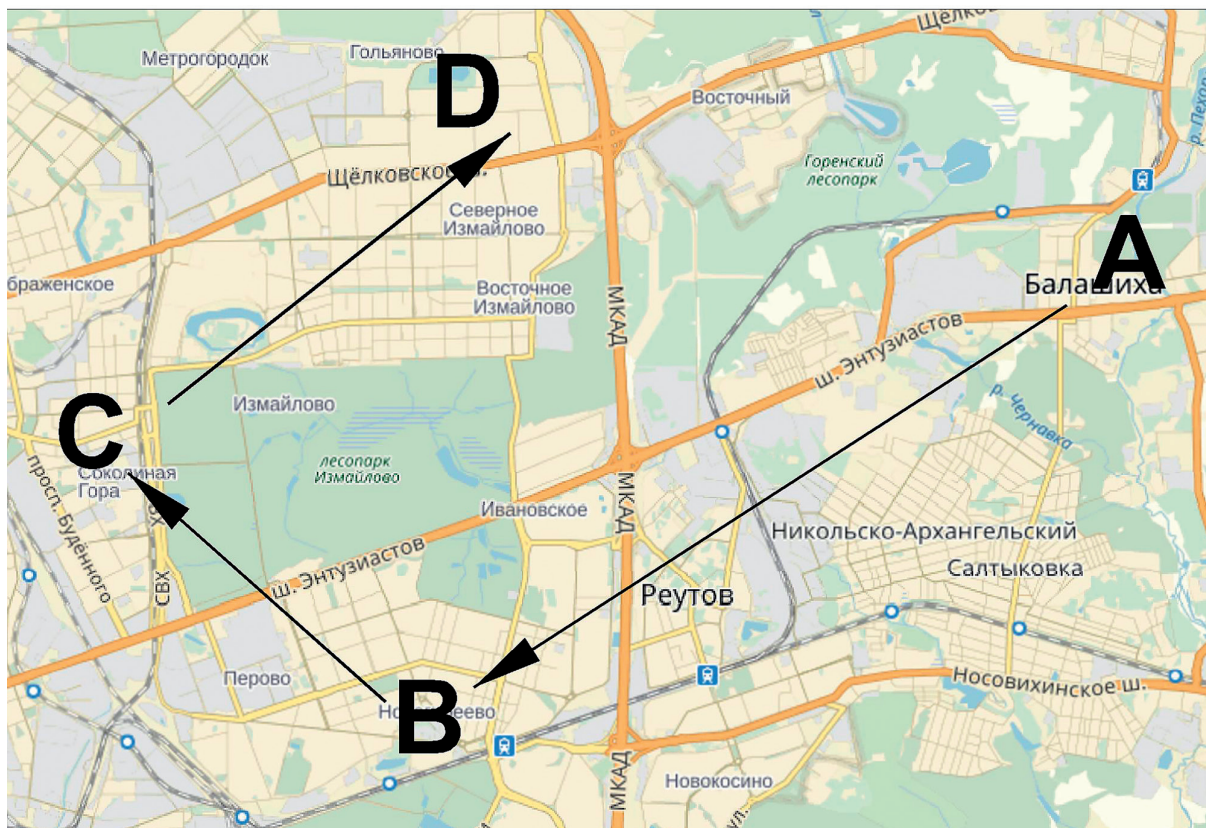


Рис. 1. Схема ранее реализованного проекта материального потока

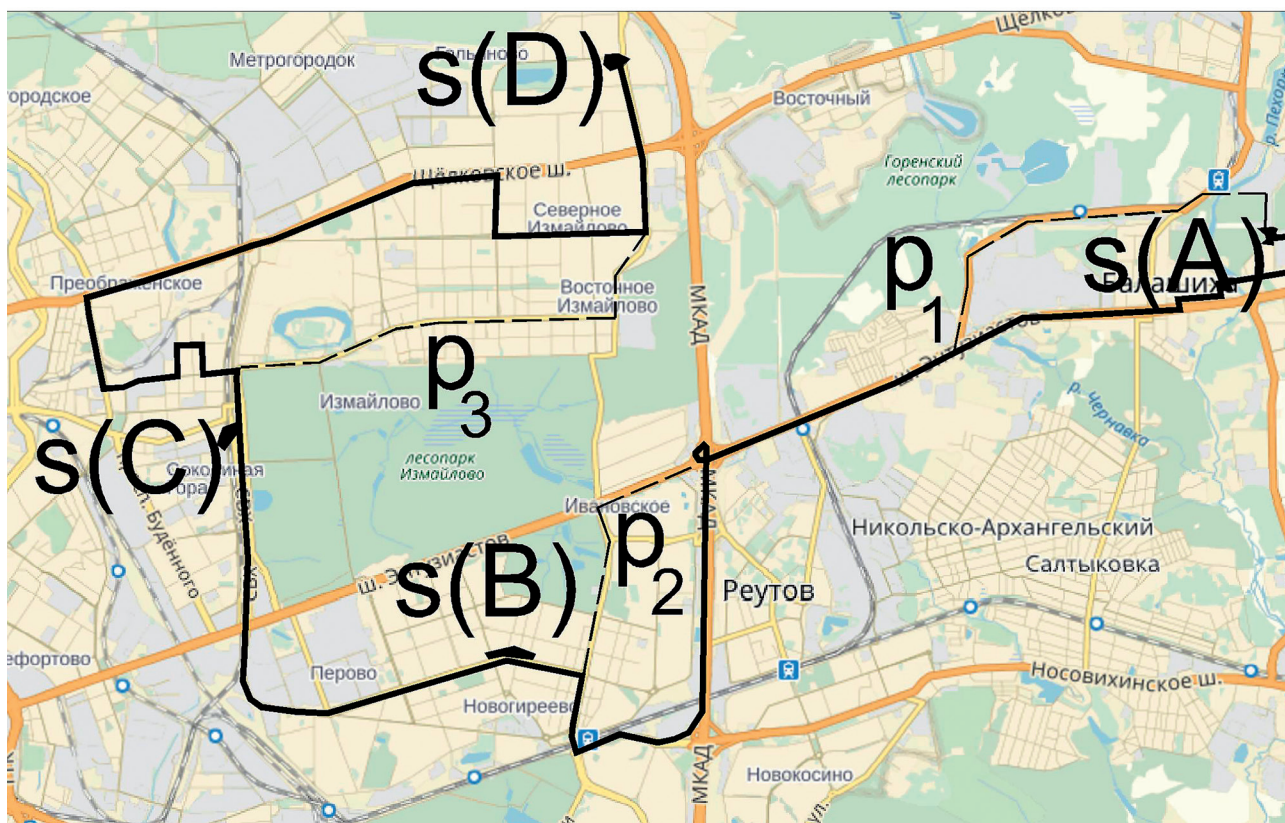


Рис. 2. Образная геоинформационная модель реализованного проекта

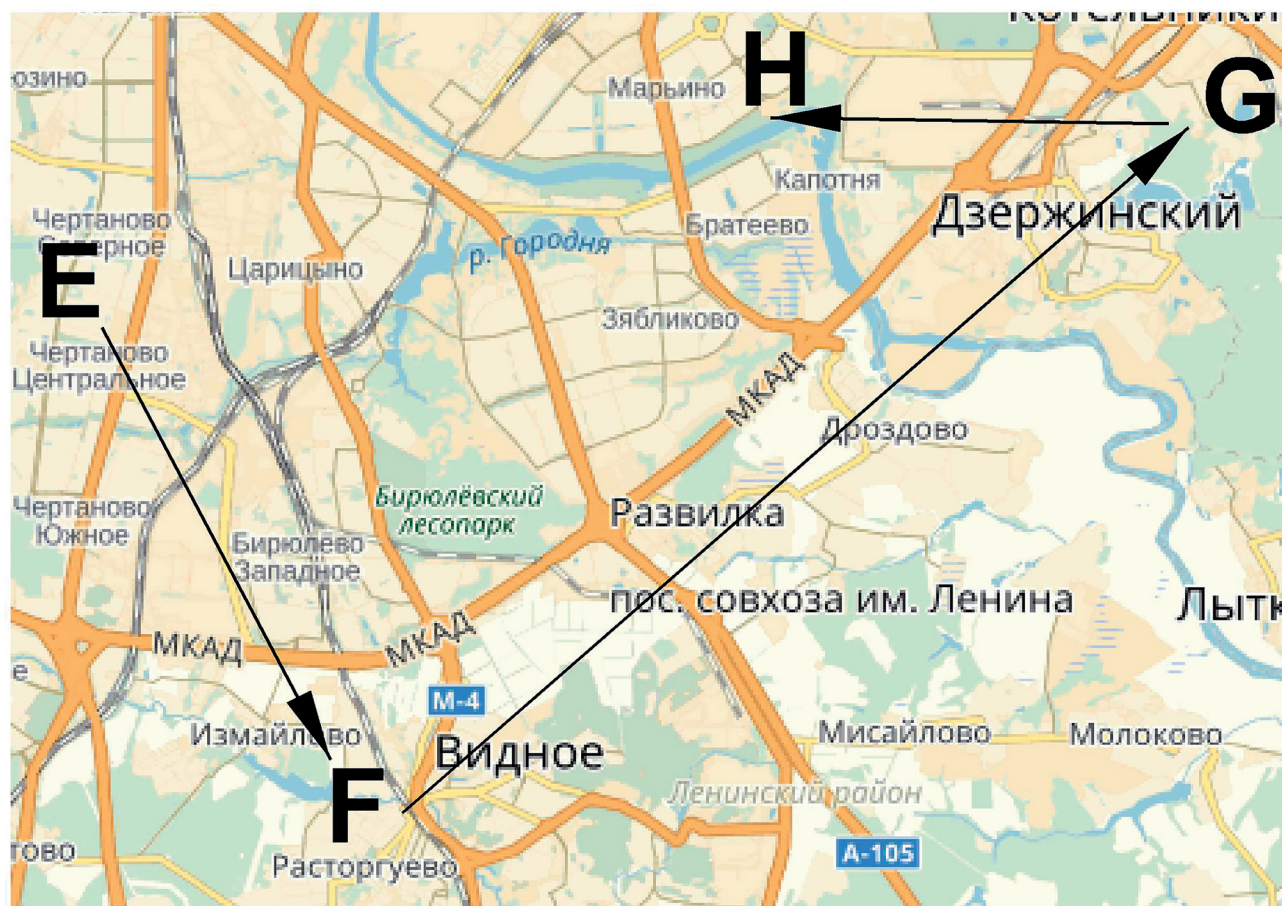


Рис. 3. Схема нового проекта материального потока

Чтобы оценить возможность использования опыта ранее реализованного проекта, выполнено метатрансформирование, результат которого показан на рис. 4. Особенности результата являются следующие:

- для точки **F** не удалось построить площадной объект логистического центра $s(F)$;
- для траектории транспортировки было получено только два преобразования P_4 и P_5 .

Поскольку метатрансформированная модель имеет центр и преобразования, можно утверждать, что соответствующий проект будет исполнен: имеются варианты транспортировки груза, любой из которых может быть использован при возникновении отклонений реальных условий транспортировки от запланированных.

Рассмотрим, каким образом следует оценивать уровень достоверности метатрансформированной модели. Мерой достоверности предлагается считать изменение размерности картографических объектов. С нашей точки зрения, изменение размерности играет основополагающую роль, поскольку определяет возможность изменения ситуации или решения. Уменьшение размерности имеет место в случае, когда площадной объект отображен в линейный или точечный либо линейный объект отображен в точечный. Увеличение размерности фиксируется, когда линейный объект отображен в площадной либо точечный объект отображен в линейный или площадной. Нейтральным является сохранение размерности картографических объектов. Отметим, что изменение размерности связано с операциями

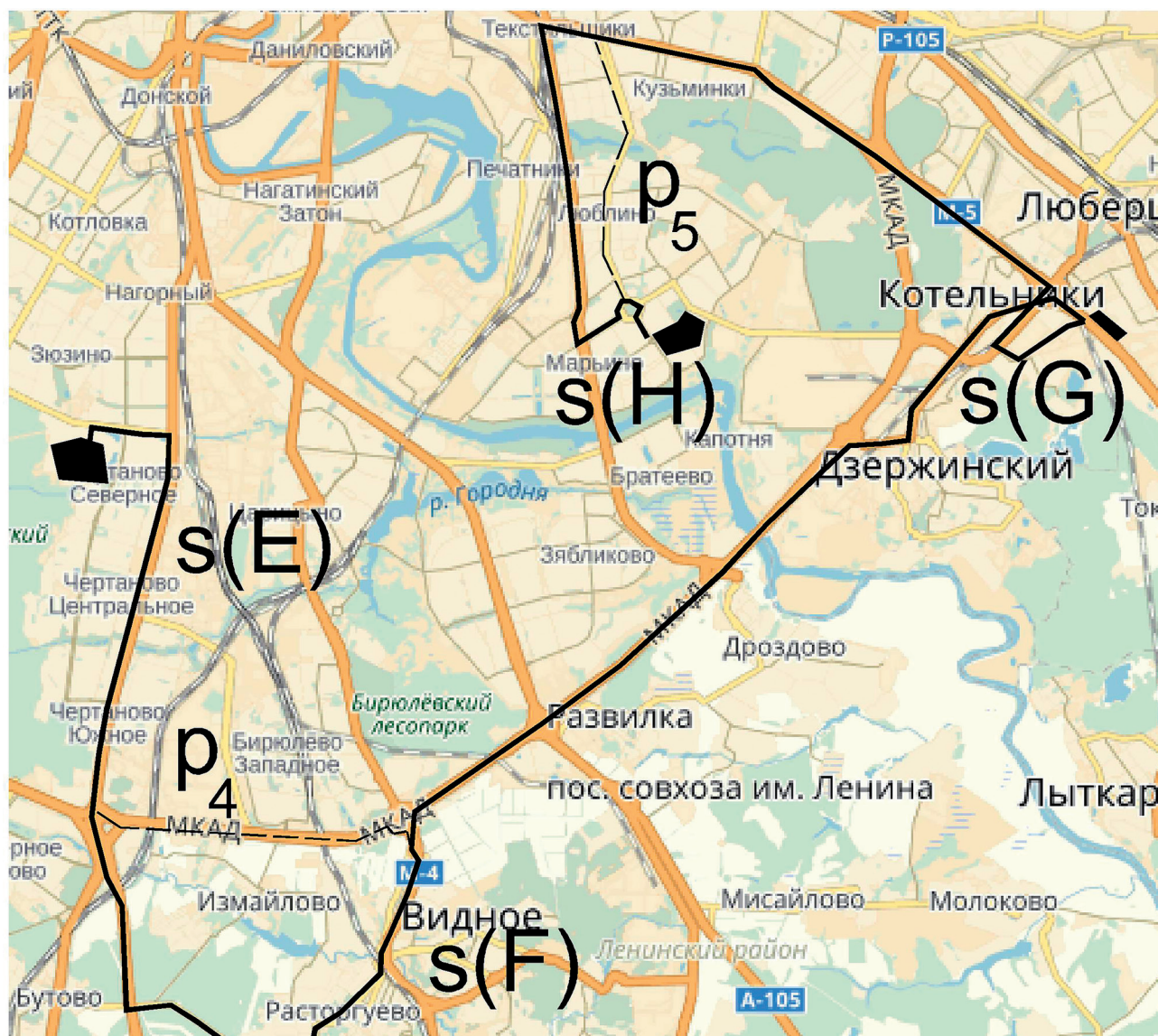


Рис. 4. Образная геоинформационная модель нового проекта

масштабирования и генерализации картографического изображения. Увеличение размерности возможно только при генерализации.

Метрику метатрансформирования определим через норму вектора

$$\|H(\bar{h}(c), c)\| = \sum_i f(h_i(c))$$

$$f(h_i(c)) = \begin{cases} f_0, & \text{если объекты отображения отсутствуют,} \\ f_1, & \text{если объекты имеют меньшую размерность,} \\ f_2, & \text{если отображение нейтрально,} \\ f_3, & \text{если объекты имеют большую размерность.} \end{cases}$$

Таким образом, достоверность оценивается взвешенной суммой показателей изменения размерности метатрансформированных объектов, отображающих преобразования ситуаций или решений. Весовые коэффициенты должны подбираться соответственно специфике конкретной прикладной области. Не рассматривая процесс подбора, отметим полезные свойства предлагаемой метрики:

- достоверность зависит от числа элементов модели. С практической точки зрения это отображает роль детализации описания проекта. Чем больше таких деталей, тем разнообразнее может оцениваться результат метатрансформирования. Например, для не равных нулю положительных значений весовых коэффициентов более высокой достоверностью может оцениваться проект, не имеющий вовсе картографического отображения. Такой результат полезен при моделировании, использующем незначительный объем опыта. Принятое решение стимулирует более глубокое изучение экспертом содержательно богатых ранее выполненных проектов;
- более высокий вес увеличивших размерность объектов повышает достоверность моделей, имеющих обобщения. Это должно использоваться при моделировании с большим объемом накопленных опытных данных.

Степень достоверности модели на рис. 4 составляет величину $R_1 = 6f_2 + f_0$. Если в базе данных ГИС найдется проект, позволяющий построить логистический центр $s(F)$ и дополнительное преобразование траектории транспортировки, степень достоверности примет значение $R_1 = 8f_2$.

Программная реализация процедуры метатрансформирования

В данном разделе анализируются особенности процедуры метатрансформирования, которые существенным образом влияют на общий эффект повышения достоверности.

Метатрансформирование модели включает в себя выполнение следующих действий:

- 1) построение картографических объектов в заданной области карты, преобразование временных и семантических атрибутов исходной в атрибуты новой модели;
- 2) оценка корректности картографического представления новой модели;
- 3) оценка результата метатрансформирования в целом, т.е. насколько эффективно сконструированы и вписаны в карту новые объекты. При неудовлетворительном уровне эффективности параметры метатрансформирования изменяются и выполняется переход к п. 1. В противном случае метатрансформирование завершено.

Алгоритм реализации п.1 может строиться различным образом, однако общим является сохранение при метатрансформировании определенного инварианта картографического отображения объектов. В качестве инварианта могут быть использованы:

- геометрические. К ним относят форму, длину, площадь, габариты и другие параметры геометрических примитивов, которые наиболее адекватно отображают компоненты логистического проекта;
- топологические. При построении новой модели сохраняются многоместные отношения с картографическими объектами базовой картографической основы. Отношения носят пространственно-временной и семантический характер. Таковыми могут быть пространственная близость, примыкание, направление, временная близость и продолжительность, семантическая однородность и ряд других;
- комбинация перечисленных выше способов.

Оценивать эффективность любого алгоритма следует возможностью совершить ошибку генерации недостоверного варианта отображения модели. Недостоверность в данном случае определяется «бессмысленностью» сгенерированного объекта. Например, траектория перевозки крупногабаритного груза не может быть проложена через недопустимо узкий мост, а площадка для перегрузки опасных промышленных отходов не может быть размещена в жилой зоне населенного пункта. Правила построения «осмысленных» моделей реализуются конкретным алгоритмом. Алгоритмы, использующие простые инварианты, дают максимальное значение ошибки. По мере усложнения алгоритма (например, за счет учета топологии траекторий транспортировки) вероятность ошибки генерации недостоверного варианта отображения падает.

Алгоритмы реализации п. 2 также многообразны и могут контролировать набор различных по сложности топологических отношений в заданном фрагменте карты. Эффективность алгоритма определяется вероятностью ошибочного удаления из карты достоверного картографического объекта. Причиной может стать неполнота, неточность, несогласованность базовой картографической основы. Например, не отображенная на карте транспортная развязка приведет к отбраковке всех вариантов проходящих по ней траекторий. Чем сложнее организован алгоритм контроля, тем меньше вероятность ошибки.

Учитывая сказанное, можно заключить, что сложность программной реализации алгоритмов метатрансформации определяется балансом потерь, порожденных ошибками:

$$W = p_1 W_1 + p_2 W_2,$$

где W суммарные потери, p_1 и p_2 , соответственно, вероятности ошибочной генерации недостоверного и ошибочного отклонения достоверного варианта геоинформационной модели, W_1 и W_2 – соответствующие потери из-за ошибок. Можно видеть, что на практике при заданных уровнях потерь могут разумно применяться комбинации простых и сложных алгоритмов процедуры метатрансформирования.

Заключение

В работе изучен подход к повышению достоверности геоинформационных моделей систем материальных потоков. Подход базируется на образном представлении и использовании опыта реализации материальных потоков. Предложено использовать процедуру метатрансформирования моделей и введены соотношения для оценки достоверности результата метатрансформирования. Оценки используют число и размерность преобразования исходных ситуаций и решений. Показано, что процедура метатрансформирования комбинирует алгоритмы, характеризующиеся вероятностями ошибочной генерации недостоверного и ошибочного удаления из карты достоверного объекта. Дальнейшие исследования могут быть направлены на построение интеллектуальной процедуры метатрансформации, основанной на знаниях.

Работа выполнена при финансовой поддержке грантов РФФИ 15-01-00149 и 16-01-00090.

Ключевые слова: геоинформационные системы, геоинформационное моделирование ситуаций, принятие решений, управление материальными потоками.

ЛИТЕРАТУРА

1. Черемисина Е.Н., Спивак Л.Ф., Спивак И.Л. Информационно-аналитическое обеспечение ситуационного центра управления территорией // Геоинформатика. – 2013. – № 3. – С. 1-7.
2. Беляков С.Л., Белякова М.Л., Самойлов Д.С. Геоинформационный сервис ситуационного центра // Информационные технологии. – 2011. – № 8. – С. 29-32.
3. Баранов Ю.Б., Берлянт А.М., Капралов Е.Г., Кошкарёв А.В., Серапинас Б.Б., Филиппов Ю.А. Геоинформатика. Толковый словарь основных терминов / под ред. А.М. Берлянта и А.В. Кошкарева. – М. : ГИС-Ассоциация, 1999. – 204 с.
4. Esri Maps for Microstrategy // Esri CIS. – URL: <http://esri-cis.ru/products/maps-for-microstrategy/detail/review/> (date of access 24.04.2016).
5. Технология построения инфраструктуры пространственных данных [Электронный ресурс] // КБ Панорама : сайт. – URL: <http://www.gisinfo.ru/support/tehn.htm#bsd> (дата обращения 21.03.2016).
6. Renolen A. Modelling the Real World: Conceptual Modelling in Spatiotemporal Information System Design // Transactions in GIS. – 2000. – 4(1) – P. 23-42.
7. Mecca G., Rull G., Santoro D., Teniente E. Ontology-based mappings // Data & Knowledge Engineering. – 2015. – № 98. – P. 8-29.
8. Belyakov S.L., Bozhenyuk A.V., Belykova M.L., Rozenberg I.N. Model of Intellectual Visualization of Geoinformation Service // Proc. 28th European Conference on Modelling and Simulation (ECMS 2014). – 2014. – P. 326-333.
9. Беляков С.Л., Белякова М.Л., Савельева М.Н. Образная модель представления опыта принятия решений с помощью геоинформационных систем // Геоинформатика. – 2014. – № 4. – С. 23-28.
10. Комплекс автоматизированного контроля качества и исправления цифровых карт [Электронный ресурс] // КБ Панорама : сайт. – URL: <http://www.gisinfo.ru/products/autoqualmap.htm> (дата обращения 11.03.2016).