

УДК 519.7: 624.1

## О СОЗДАНИИ ГЕОИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ ГИПЕРСЕТЕЙ ДЛЯ ОРГАНИЗАЦИИ ИНЖЕНЕРНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ СОВРЕМЕННЫХ ГОРОДОВ

Токтошов Гулжигит Ысакович,

кандидат технических наук, младший научный сотрудник лаборатории системного моделирования Института вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, Россия, 630090, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 6. E-mail: tgi\_tok@rambler.ru

*Инженерная инфраструктура современных городов представляет собой весьма сложную иерархическую систему, создание которой предполагает структуризацию процесса проектирования на отдельные подсистемы с учетом перспективы их развития и реконструкции. При проектировании коммуникаций должны учитываться технические возможности и экономическая целесообразность их построения на соответствующем месте, от которых зависит эффективность функционирования предполагаемой коммуникации. В связи с этим актуальным является создание специализированных геоинформационных систем, позволяющих оценить проектную стоимость коммуникаций до начала строительно-монтажных работ и учесть пространственное расположение различных инженерных сетей, их многоуровневость и взаимодействие.*

**Цель работы:** разработка методики создания специализированных геоинформационных систем на основе гиперсетевого подхода, позволяющей проектировщику или пользователю при организации и управлении инженерной инфраструктурой городов учитывать пространственное расположение различных инженерных сетей, их многоуровневость и взаимодействие.

**Методы исследования:** метод дискретизации области в построении модели местности; методы теории графов для поиска оптимальных маршрутов при прокладке инженерных сетей; методы теории гиперсетей для описания многоуровневости инженерной инфраструктуры современных городов.

**Результаты:** предложена гиперсетевая технология создания специализированных геоинформационных систем, основанная на модели гиперсетей и структурировании процесса проектирования на отдельные подсистемы. Такой подход, в отличие от традиционных способов создания ГИС-технологий, позволяет организовать оптимальное пространственное размещение инженерных сетей различного назначения на этапе их проектирования с учетом их взаимосвязи и взаимозависимости. Предлагаемая в настоящей работе методика создания специализированных ГИС, основанная на теории гиперсетей, позволяет учитывать особенности реальной местности, вида и назначения проектируемой коммуникации.

### Ключевые слова:

Инженерная инфраструктура, область размещения, геоинформационная система, граф, гиперсеть.

### Введение

Городская инженерная инфраструктура – это сложная система, состоящая из систем водо-, тепло- и газоснабжения, канализации, транспорта и дорог, электроснабжения, электросвязи и т. д. Другими словами, основу инженерной инфраструктуры составляет инженерно-энергетический комплекс, обеспечивающий теплом, водой, электроэнергией и связью жилые и общественные здания.

Для организации и управления территориально распределенными инженерными сетями различного назначения активно применяются геоинформационные системы (ГИС) [1–6], позволяющие полностью или частично автоматизировать различные виды работ.

Анализ литературных источников показывает, что ГИС играет ключевую роль в различных областях науки, таких как оптимизация городских телекоммуникационных [1] и транспортных [2, 3] сетей, модернизация систем электро- и газоснабжения [4], создание единой карты инженерных сетей города [5], размещение технических объектов на заданной территории [6] и других.

При этом цена ошибки при применении ГИС на этапе проектирования достаточно высока. Например, при строительстве и создании инженерных коммуникаций незначительное отклонение в расчетах может привести к серьезным последствиям –

к увеличению расходов на реализацию проекта, снижению уровня безопасности для пользователей проектируемых объектов. С другой стороны, в условиях дефицита свободных территорий в современных городах инженерная инфраструктура, имеющая сетевую структуру, может быть использована как самостоятельно, так и в качестве подосновы для наложения других систем. Так, например, опоры сетей воздушных линий электропередач обычно используются и для прокладки сетей электросвязи.

Таким образом, актуальным является создание специализированных ГИС, позволяющих проектировщику или пользователю при организации и управлении сетевой инфраструктуры городов учитывать многоуровневую структуру, образованную наложенными сетями. В настоящей работе в качестве математической основы для создания таких систем предлагается использовать гиперсетевый подход, что позволит на этапе проектирования организовать оптимальное пространственное размещение инженерных сетей различного назначения с учетом многоуровневости процесса их построения.

### Математическое обеспечение создания ГИС

В настоящее время проблема оптимального проектирования сложных территориально распределенных систем городской инженерной инфра-

структуры является одной из самых актуальных в строительной отрасли. Данная проблема включает постановку, формализацию и типизацию проектных решений, процедур и процессов проектирования в интегрированной технологии ГИС и САПР (систем автоматизированного проектирования) [7]. Немаловажным аспектом в создании интегрированной технологии ГИС и САПР, опирающейся на общую математическую и информационную основу, является их универсальность. Однако в настоящее время создание универсальных интегрированных ГИС и САПР затруднено, так как специализированные программы моделирования и расчета являются недостаточно открытыми и их интеграция на основе современных принципов и технологий невозможна [8]. С другой стороны, для создания такой технологии требуется достаточно универсальный математический аппарат, который позволит на этапе проектирования учесть пространственное расположение различных инженерных сетей, их многоуровневость и взаимодействие.

Известно, что в качестве математической основы создания ГИС и САПР используются цифровые модели местности (ЦММ) [9, 10]. Наиболее распространенным методом построения ЦММ является переход к дискретному аналогу местности на основе сеточной технологии. Далее на основе существующих методов оптимизации находятся пути на сетке карты для оптимального пространственного размещения инженерных сетей различного назначения.

Для решения проектных задач по организации и управлению инженерными сетями различного назначения в основном используются методы теории графов [11–13]. При этом результаты проектирования на одном из уровней не применяются в качестве исходных данных для последующих уровней. Таким образом, в процессе проектирования не учитываются взаимосвязи и взаимозависимости между уровнями. Другими словами, графы используются для каждого из уровней отдельно. В результате предполагаемый вариант конфигурации проектируемой сети может не являться оптимальным, а в ряде случаев при эксплуатации может привести к нестабильной работе проектируемой сети.

В связи с этим в настоящей работе в качестве математической основы создания специализированной ГИС предлагается гиперсетевая технология оптимизации строительства сетевой инфраструктуры современных городов [14–17].

Понятие «гиперсеть» впервые было введено в работе [14] в качестве математической модели для описания сложных сетевых структур, в первую очередь сетей связи. Гиперсети, в том числе иерархические, нестационарные и структурированные, в отличие от графов, описывают системы, имеющие более двух образующих множеств с учетом реализации одной структуры в другой. В настоящей работе, в отличие от [14–17], гиперсети применяются для оптимизации процесса проектирования

сетевой инфраструктуры современных городов, имеющей многоуровневую структуру.

Следует отметить, что применение модели гиперсетей в качестве альтернативы существующим методам и технологиям создания ГИС расширяет функциональную возможность проектируемых ГИС за счет использования возможностей гиперсетевого подхода для анализа и организации многоуровневых систем.

#### Гиперсеть

Учет многоуровневости процесса проектирования инженерных сетей современных городов, обусловленной вложенностью сетей, можно произвести за счет разделения на первичную и вторичную сеть – так же как и в сетях связи. При этом топология первичной сети описывается графом  $PS=(X,V;P)$ , в котором вершины  $X$  соответствуют узлам существующей сети, а ребра  $V$  – ветвям. Каждое ребро  $V$  первичной сети  $PS$  представляется в виде трасс для прокладки линий проектируемой сети. Вторичная сеть  $WS=(Y\subseteq X,R;W)$  соответствует структуре проектируемой сети, у которой множества вершин  $Y$  разбиты на два непересекающихся подмножества, т. е.  $Y=I\cup J$  и  $I\cap J=\emptyset$ . Первое подмножество  $I=\{1,\dots,m\}$  содержит вершины, соответствующие пунктам, где могут быть размещены источники целевой продукции. Второе подмножество  $J=\{1,\dots,n\}$  содержит вершины, соответствующие потребителям. Ребра  $R$  графа вторичной сети  $WS$  соответствуют физическим линиям (трубы, кабели и т. д.), которые непосредственно осуществляют перемещение целевой продукции от источника к потребителям. Взаимодействие этих подсистем определяется двухуровневой гиперсетью [15].

*Определение 1.* Гиперсеть  $S=(X,V,R;P,F,W)$  включает следующие объекты:

- $X=(x_1,x_2,\dots,x_n)$  – множество узлов (вершин);
- $V=(v_1,v_2,\dots,v_g)$  – множество трасс;
- $R=(r_1,r_2,\dots,r_m)$  – множество физических линий (труб, кабелей и т. п.);
- $P:V\rightarrow 2^X$  – отображение, сопоставляющее каждому элементу  $v\in V$  множество вершин  $P(v)\subseteq X$ . Тем самым отображение  $P$  определяет граф первичной сети  $PS=(X,V;P)$ ;
- $F:R\rightarrow 2^V_{PS}$  – отображение, сопоставляющее каждому элементу  $r\in R$  множество трасс  $F(r)$ , образующих простой маршрут в графе  $PS=(X,V;P)$ . Причем семейство  $2^V_{PS}$  содержит такие подмножества, трассы которых составляют связную часть графа  $PS$ . Отображение  $F$  определяет гиперграф  $FS=(V,R;F)$ . Множество всех маршрутов  $F(r)$ , отображающее каждому ребру  $r\in R$  графа  $WS$  единственный маршрут в графе  $PS$ , назовем вложением графа  $WS$  в  $PS$ .
- $W:r\rightarrow 2^{P(F(r))}$  – отображение, сопоставляющее каждому элементу  $r\in R$  множество вершин  $W(r)\subseteq P(F(r))$  в графе  $PS$ , где  $P(F(r))=Y$  – множество вершин в  $PS$ , инцидентных трассам  $F(r)\subseteq V$ . Отображение  $W$  определяет граф вторичной сети  $WS=(Y,R;W)$ .

Из определения гиперсети следует, что математическая модель возможных трасс соответствует первичной сети  $PS=(X,V;P)$ , а конфигурация проектируемой сети – вторичной сети  $WS=(X,R;W)$ . Взаимодействие этих сетей определяется гиперсетью  $S$ , т. е. ветвь  $v \in V$  инцидентна ребру  $r \in R$  тогда и только тогда, когда соответствующее ребро  $r$  вторичной сети реализовано по ветви  $v$  соответствующей трассы  $F(r)$ .

#### Иерархическая гиперсеть

Использование обычной гиперсети ограничивается двумя уровнями. На практике процесс построения инженерной сети целесообразно разбить на ряд этапов, или уровней детализации (более чем двух), на каждом из которых решают соответствующие задачи, в зависимости от результата предыдущего уровня. Другими словами, на каждом этапе генерируется некоторое множество возможных вариантов, подавляющее большинство которых отбрасывается при последующем анализе ввиду невыполнения условий, налагаемых системой ограничений, или же в соответствии со стоимостной оценкой. Каждый из вариантов, отобранных на предыдущем уровне детализации, генерирует некоторое множество на последующем. Среди этого множества снова происходит сравнение и выбор, что позволяет существенно уменьшить как число просматриваемых вариантов, так и количество их сравнений между собой.

Здесь процесс проектирования инженерных сетей рассматривается как четырехуровневая иерархическая система, состоящая из следующих уровней (подсистем):

- информационное обеспечение процесса проектирования сетей (построение ЦММ);
- построение сети ситуационных или возможных трасс;
- поиск оптимальных трасс для прокладки инженерных сетей;
- реализация (размещение) инженерной сети по найденным трассам.

Каждый слой, или уровень, описывается соответствующим графом, при этом множество вершин графа верхнего слоя является подмножеством вершин нижнего слоя. Взаимодействие этих подсистем удобно описывать моделью иерархической гиперсети [16, 17].

Далее рассмотрим задачи анализа сетей при проектировании инженерных коммуникаций, соответствующих каждому иерархическому уровню. Пусть  $\Omega$  – заданная территория, на которой предполагается вести строительство. Для построения модели местности и дальнейшего поиска возможных трасс предлагается перейти к дискретному аналогу области  $\Omega$ , что можно сделать, например, наложением регулярной сетки [18]. На множество узлов сетки построим граф вида  $PG=(X_0,G;F_0)$ , в котором вершины  $X_0$  соответствуют узлам полученной сетки  $\Omega$ , а ребра  $G$  – ветвям.

Для построения сети возможных трасс и дальнейшего определения конкурирующих вариантов трассы из рассмотрения сразу же исключаются объекты и участки местности, через которые проход трассы инженерной сети либо заведомо нецелесообразен, либо вовсе невозможен. Также устанавливаются фиксированные точки и направления, проход трассы через которые обязателен.

Чтобы построить сеть ситуационных трасс для дальнейшего поиска оптимальных решений, так же как и в [19], введем области запрета  $\Omega_s \subset \Omega$ ,  $s=1,2,\dots,S$ , заданные своими границами. В качестве областей запрета могут выступать природные участки или искусственные сооружения, проход через которые либо экономически нецелесообразен, либо технически невозможен: геодезические отметки, овраги, водные преграды, заболоченные или лесистые участки, участки социального и сельскохозяйственного назначения, существующие коммуникации (эстакады), территории промышленных предприятий, населенные пункты, территории оборонных объектов, заповедные зоны и т. д.

Кроме того, возможность прокладки маршрута ограничивается характеристиками рельефа местности – его крутизной и кривизной. Проблема кривизны рельефа может быть решена с использованием сплайнов [7, 8]. Чтобы учесть крутизну, введем следующие обозначения:  $\alpha$  – угол между отрезком в пространстве, соединяющим некоторые пары узлов, и горизонтальной поверхностью  $\Omega$ ;  $\alpha_{up}$  – предельно допустимый угол прокладывания коммуникаций вверх по склону;  $\alpha_{down}$  ( $\alpha_{down} < 0$ ) – предельно допустимый угол прокладывания коммуникаций вниз по склону;  $\alpha_{side}$  – предельно допустимый угол прокладывания коммуникаций горизонтально по склону.

Пусть  $\mu = x_{j_1} v_{j_1} x_{j_1+1} \dots x_{j_n} v_{j_n} x_{j_n+1} \dots x_{j_n+m} v_{j_n+m}$  – некоторая трасса, где  $j=1,2,\dots,n$ ;  $i=1,2,\dots,m$  – множество номеров вершин (или ребер) в графе  $PG=(X_0,G;F_0)$ . Тогда для проектируемого вида коммуникаций и для ее трассы возможны следующие ограничения:

1)  $\mu \subset \Omega$ ,  $\forall j \neq k, i \neq r: k, r = \{-1; 0; 1\}$  – нахождение трассы внутри рассматриваемой области;

2)  $\mu \not\subset \Omega_s$ ,  $\forall j \neq k, i \neq r: k, r = \{-1; 0; 1\}$  и  $\forall s$  – непрохождение трассы через области запрета;

3) если  $\alpha \leq \alpha_{up}$ , то прокладка инженерных коммуникаций вверх по склону разрешена, в противном случае – нет;

4) если  $\alpha \geq \alpha_{down}$ , то прокладка инженерных коммуникаций вниз по склону разрешена, в противном случае – нет;

5) если  $\alpha \leq |\alpha_{side}|$ , то прокладка инженерных коммуникаций горизонтально по поверхности склону разрешена, в противном случае – нет. Ясно, что в природных условиях  $\{\alpha_{up}, \alpha_{down}, \alpha_{side}\} < 90^\circ$ .

В общем случае  $\alpha_{up} \neq \alpha_{down}$  и, как правило,  $|\alpha_{side}| < \min\{\alpha_{up}; -\alpha_{down}\}$ , что приводит к неравенству значений веса от узла к узлу соседнему и наоборот. Таким образом, построенный нами граф  $PG=(X_0,G;F_0)$  является ориентированным.



Последние три ограничения связаны с безопасностью строительства и эксплуатацией инженерных коммуникаций, поскольку значения этих углов определяются видом и назначением инженерной коммуникации, а также свойствами грунта вдоль трассы для их прокладки.

Ограничение 2 означает, что вершины  $X' \subset X_0$  графа  $PG=(X_0, G; F_0)$ , попавшие в какую-либо из областей  $\Omega_s, s=1, 2, \dots, S$ , изолируются, то есть весам ребер, соединяющим данный узел со всеми соседними и наоборот, присваивается значение бесконечности. Аналогично невыполнение хотя бы одного ограничения из 3–5 для некоторого ребра равнозначно присвоению весу ребер значения бесконечности. Ребра с бесконечным весом ребер из графа  $PG=(X_0, G; F_0)$  удаляются, в результате получается некоторая «дискретная плоскость с запретами», которые ограничивают прокладку инженерной сети как по плану, так и по профилю. Будем моделировать «дискретную плоскость с запретами» графом  $PO=(X_1 \subseteq X_0, U; F_1)$ , в котором  $X_1 = X_0 \setminus X'$ ,  $U_1 = G \setminus G'$  и  $X_1 \subseteq X_0, U_1 \subseteq G$ . Полученный граф назовём графом ситуационных (возможных) трасс для поиска оптимальных маршрутов прокладки инженерных коммуникаций.

На третьем этапе производится трассировка сети, т. е. окончательно выбираются участки для прокладки сетей от источников к потребителям. Выбор трассы для прокладки сетей зависит от конструкции, требований техники безопасности, степени застройки и от ряда других причин, характерных для конкретных инженерных сетей. Другими словами, при выборе трассы обязательно должны учитываться вид и назначение проектируемой сети. Структуре возможных трасс поставим в соответствие граф  $PS=(X_2 \subseteq X_1, V; F_2)$ , в котором вершина – возможные пункты размещения источников и потребителей, а ребра  $V$  – участки возможных трасс.



Рисунок. Иерархическое представление построения сетей

Figure. Hierarchical representation of construction networks

На последнем этапе выбираются параметры элементов проектируемой сети, оптимальные по некоторому критерию (стоимости, длине и т. д.). Пусть структуре проектируемой сети, удовлетворяющей некоторому критерию оптимальности, соответствует граф  $WS=(X_3 \subseteq X_2, R; F_3)$ , в котором вершины соответствуют местам непосредственного размещения источников и потребителей ( $X_3 = I \cup J$ ),

а ребра  $R$  – физическим линиям. Тогда процесс проектирования инженерной сети завершится реализацией ребер графа проектируемой сети по соответствующим маршрутам графа оптимальных трасс. В общем случае взаимодействие этих подсистем (графов) моделируется иерархической 3-гиперсетью [20] (рисунок).

#### Структурированная гиперсеть

При большом количестве сетей и недостатке свободных территорий в современных городах целесообразно применять совместную прокладку коммуникаций по единым строительным конструкциям. Для решения задач совмещенного размещения инженерных сетей возникает необходимость преобразовать гиперсеть  $S=(Y, V, R)$  по следующему правилу. В гиперсети вида  $S$  узел  $y \subset Y$  заменяется на граф вида  $y=\{x_j^i, E_j\}$  (граф узла  $y$  структурированной гиперсети), где  $x_j^i$  –  $j$ -я вершина вторичной сети  $WS_j$ , отображенная в узел  $y \subset Y$  структурированной гиперсети  $SA=(Y, V, G(X_i, R_i))$ . Таким образом, в отличие от гиперсетей вершины вторичных сетей помещаются в узлы первичной сети независимо друг от друга, без ограничения на характер отображения.

Дадим формальное определение структурированной гиперсети. Пусть задано множество графов:  $G_0=(X^0, V), G_1=(X^1, U^1), \dots, G_k=(X^k, U^k)$ , соответствующее инженерным коммуникациям различного назначения. Задано также корневое дерево  $T_0=(Z, R)$ , где  $Z=z_0, z_1, \dots, z_k, R=r_1, \dots, r_k$  – определяющее вложение графов  $G_j$  в  $G_i$  ( $i > j$ ). Такое вложение, определяется также как и в гиперсетях, за тем исключением, что вершины  $x_k^i$  и  $x_j^i$  графов  $G_i$  и  $G_j$  не тождественны, а инцидентны. Очевидно, что одной и той же вершине  $x_k^i$  могут быть инцидентны несколько вершин  $X_k^i = \{x_k^{i_1}, x_k^{i_2}, \dots, x_k^{i_l}\}$  из  $l$  графов  $\{G_j\}, s=1, \dots, l$ . На множестве вершин  $X_k^i$  определяется граф  $L^i = \{X_k^i, E\}$ . Вершины  $x_k^{i_1}$  и  $x_k^{i_2}$  смежны в  $L^i$ , если соответствующие графы  $G_j$  и  $G_{j_2}$  в вершине  $x_k^i$  имеют некоторую системообразующую связь  $l(x_k^{i_1}, x_k^{i_2})$ . В противном случае эти вершины не смежны. Так же как и в гиперсетях, ребру  $u_i^j \in G_j$  в графе  $G_i$  сопоставляется цепь или некоторая связанная часть между соответствующими вершинами из  $G_i$ . Необходимо отметить, что системообразующие связи типа  $\{l(x, y)\}$  могут иметь различную природу и, как правило, существенно зависят от вида ограничений, налагаемых на проектируемый тип сетей. В некоторых случаях, например в системе транспортных сетей разного типа (метро, автобус, трамвай), такими связями в транспортных мультиузлах будут тротуарные линии (пешеходные переходы). В этом случае имеет смысл рассматривать объединение всех вторичных сетей. Для некоторых задач имеет смысл рассматривать сумму всех графов гиперсети, включая первичную сеть  $PS$ , т. е.  $G = G_0 + G_1 + \dots + G_k + \{L^i\}$ . Более подробно с моделями структурированной гиперсети можно ознакомиться в работе [16]. В настоящей работе системообразующие связи типа  $\{l(x, y)\}$  учитываются

в виде ограничений различного характера, которые будут представлены ниже.

Рассмотрим прямоугольную систему координат  $XYZO$  с метрикой пространств  $\rho$ , выбор которой обусловлен требованием прокладки инженерных коммуникаций по координатным осям:

$$\rho(M, N) = |X_M - X_N| + |Y_M - Y_N| + |Z_M - Z_N|,$$

где  $\rho(M, N)$  – расстояние между двумя точками  $M$  и  $N$  пространства  $XYZO$ .

При решении задачи прокладки инженерных коммуникаций различного назначения пространственное положение  $j$ -й коммуникации зададим вектором

$$T_j = (X_{j0}, Y_{j0}, Z_{j0}, X_{j1}, Y_{j1}, Z_{j1}, \dots, X_{jK_j}, Y_{jK_j}, Z_{jK_j}, Q_j),$$

где  $X_{j0}, Y_{j0}, Z_{j0}$  – координаты начала трассы;  $X_{jK_j}, Y_{jK_j}, Z_{jK_j}$  – координаты конца трассы;  $X_{jM}, Y_{jM}, Z_{jM}$ ,  $M=1, \overline{K_j-1}$  – координаты точек изломов трассы;  $K_j$  – число прямоугольных фрагментов в  $j$ -й трассе;  $Q_j$  – угол поворота  $j$ -й коммуникации относительно ее первоначального положения.

При решении задачи прокладки совмещенных инженерных сетей различного назначения часто приходится иметь дело с разветвленными соединениями. В этом случае целесообразно использовать более детальное описание связывающих сетей, основанное на использовании «узлов» и «линейных участков». Под узлом будем понимать точку пересечения (соединения) двух или более линейных участков связывающих сетей. Под линейным участком – совокупность всех элементов, входящих в состав соединения любых двух узлов.

Задача прокладки совмещенных инженерных сетей различного назначения в одной траншее предполагает следующие ограничения:

- ограничение на предельно допустимый размер траншеи:

$$\begin{aligned} X_M^{\min} \leq X_M \leq X_M^{\max}; Y_M^{\min} \leq Y_M \leq Y_M^{\max}; \\ Z_M^{\min} \leq Z_M \leq Z_M^{\max}; \end{aligned} \quad (1)$$

- размещения  $j$ -й коммуникации в траншее:

$$K(J) \in K(X_M, Y_M, Z_M); \quad (2)$$

- размещение однотипных коммуникаций в один ряд:

$$z_{i1} = z_{i2}, (y_{i1} = y_{i2}) \vee (x_{i1} = x_{i2}); \quad (3)$$

- обеспечение требуемого расстояния между коммуникациями различного назначения:

$$\rho(J_i, J_k) \geq [\rho 1]_{ik}, i \neq k, \quad (4)$$

где  $[\rho 1]_{ik}$ ,  $\forall i \neq k$  – нормативное расстояние между коммуникациями различного назначения, определяемое соответствующими правилами безопасности [21];

- ортогональность фрагментов совместимых коммуникаций:

$$\begin{aligned} (x_{j_{n+1}} - x_{j_n})(y_{j_{n+1}} - y_{j_n}) &= 0 \vee \\ \vee (x_{j_{n+1}} - x_{j_n})(z_{j_{n+1}} - z_{j_n}) &= 0 \vee \\ \vee (y_{j_{n+1}} - y_{j_n})(z_{j_{n+1}} - z_{j_n}) &= 0; \end{aligned} \quad (5)$$

- непересечения несовместимых коммуникаций друг с другом:

$$K(J_i) \cap K(J_k) = \emptyset, i \neq k; \quad (6)$$

- непересечения трасс несовместимых коммуникаций друг с другом:

$$K(T_i) \cap K(T_k) = \emptyset, i \neq k; \quad (7)$$

- трассы не должны проходить в зонах обслуживания коммуникаций:

$$\begin{aligned} K(T_j) \cap K(C_c^{обсл.}) &= \emptyset, \\ j = 1, 2, \dots, J, c = 1, 2, \dots, C_{обсл.} \end{aligned} \quad (8)$$

С учетом введенных понятий и ограничений задача прокладки совмещенных инженерных коммуникаций формулируется следующим образом: построить  $S$ -гиперсеть  $SA=(Y, V, G(X_i, R_i))$ , для которой выполняется некоторый критерий оптимальности построения сетей (например, стоимость строительства, время строительства и т. п.), при ограничениях (1)–(8). Следует отметить, что варьируя ограничениями (1)–(8) и критериями оптимальности, можно получить практически любую частную постановку задач оптимизации сетей.

### Заключение

Предложенная методика создания ГИС носит рекомендательный характер и может быть использована разработчиками специализированных ГИС в области проектирования и эксплуатации сетей инженерных коммуникаций различного назначения.

В качестве математической основы создания специализированных ГИС предложены модели теории гиперсетей, которые позволяют описывать пространственное расположение различных инженерных сетей, их многоуровневость и взаимодействие.

Показано, что процесс проектирования инженерных сетей нельзя рассматривать без увязки одной системы с другой. Другими словами, в задачах оптимизации сетей совместно должны решаться задачи поиска трассы для данного вида инженерной сети и размещения линий (труб, кабелей и т. п.) по найденным трассам.

В общем случае суть предлагаемой технологии создания специализированных ГИС, основанной на иерархическом представлении процесса проектирования, заключается в построении множества вариантов проектных решений на каждом уровне и усечении этого множества до некоторой целесообразной подсистемы. Такое усечение может осуществляться по критерию экономической целесообразности и технической возможности построения сети на соответствующем месте.

В целом предложенная технология, в отличие от традиционного подхода строительства инженерных сетей, позволяет учесть взаимодействие отдельных подсистем, что важно для комплексной оценки характеристик элементов проектируемой сети и области размещения на этапе их проектирования.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Fry C. GIS in telecommunications // Longley P., Goodchild M., Maguire D., Rhind D. Geographical information systems: management issues and applications. – Wiley, New York, 1999. – V. 2. – P. 819–826.
2. Waters N. Transportation GIS: GIS-T // Longley P., Goodchild M., Maguire D., Rhind D. Geographical information systems: management issues and applications. – Wiley, New York, 1999. – V. 2 – P. 827–844.
3. Analysing the impact of network change on transport disadvantage: a GIS-based case study of Belfast / N. Blair, J. Hine, S. Murtagh, A. Bukhari // Journal of Transport Geography. – 2013. – V. 31. – P. 192–200.
4. Meehan B. Empowering electric and gas utilities with GIS. – Redlands: Environmental Systems Research Institute, 2007. – 280 p.
5. Косьяков С.В., Гадалов А.Б., Садыков А.М. О подходе к реализации распределенной ГИС для ведения единой карты инженерных сетей города // Вестник ИГЭУ. – 2014. – № 5. – Вып. 5. – С. 1–7.
6. Садыков А.М. Методы и алгоритмы поиска и оценки вариантов размещения технических объектов на городских территориях: дис. ... канд. техн. наук. – Санкт-Петербург, 2015. – 161 с.
7. Субботин С.А., Сарычев Д.С., Скворцов А.В. Интеграция технологий ГИС и САПР при создании информационной системы автомобильных дорог // ИНТЕРЭКСПО ГЕО-СИБИРЬ. – 2006. – № 1. URL: <http://cyberleninka.ru/article/n/integratsiya-tehnologiy-gis-i-sapr-pri-sozdanii-informatsionnoy-sistemy-avtomobilnyh-dorog> (дата обращения: 16.06.2015).
8. Сарычев Д.С. Современные информационные системы для инженерных сетей // Вестник ТГУ. – 2003. – № 280. – С. 358–361.
9. Harabor D., Grastien A. Online graph pruning for pathfinding on grid maps // Proceedings of the 25th National Conference on Artificial Intelligence (AAAI). – San Francisco, 2011. – P. 1114–1119.
10. Мелькумов В.Н., Кузнецов И.С., Кузнецов Р.Н. Определение оптимального маршрута трассы газопровода на основе карт стоимости влияющих факторов // Научный вестник ВГАСУ. Строительство и архитектура. – 2009. – № 1 (13). – С. 21–27.
11. Кристофидес Н. Теория графов. Алгоритмический подход. – М.: Мир, 1978. – 432 с.
12. Филлипс Д., Гарсна-Диас А. Методы анализа сетей / пер. с англ. – М.: Мир, 1984. – 496 с.
13. Фрэнк Г., Фриш И. Сети, связи и потоки. – М.: Связь, 1978. – 448 с.
14. Попков В.К. Гиперсети и структурные модели сложных систем // Математические и имитационные модели сложных систем. Системное моделирование. – Новосибирск, 1981. – С. 26–48.
15. Попков В.К. Математические модели связности. – Новосибирск: ИВМиМГ СО РАН, 2006. – 490 с.
16. Попков В.К. Применение теории S-гиперсетей для моделирования систем сетевой структуры // Проблемы информатики – 2010. – № 4. – С. 17–40.
17. Попков В.К. Структурные модели многослойных нестационарных систем // Труды X Международной Азиатской школы-семинара «Проблемы оптимизации сложных систем» – Кыргызская Республика, 2015. – Ч. II. – С. 562–573.
18. Токтошов Г.Ы. Гиперсетевой подход к проектированию инженерных сетей // Российская научно-техническая конференция «Информатика и проблемы телекоммуникаций». – Новосибирск, 2011. – Т. 1. – С. 167–170.
19. Абрамов Ю.А., Тарасенко А.А. Оптимизация маршрута движения в условиях пересеченной местности // Науковий вісник будівництва. – 2009. – Вип. 52. – С. 401–407.
20. Токтошов Г.Ы. Гиперсети в моделировании и оптимизации совмещенной прокладки подземных инженерных коммуникаций // Проблемы информатики. – 2014. – № 1 (22) – С. 15–23.
21. СНИП П-89–90. Генеральные планы промышленных предприятий. URL: <http://www.skonline.ru/doc/784.html> (дата обращения: 23.05.2015).

*Поступила 06.07.2015 г.*

UDC 519.7: 624.1

## ON CREATION OF GEOGRAPHIC INFORMATION SYSTEMS BASED ON HYPERNETWORKS FOR THE ORGANIZATION OF THE ENGINEERING INFRASTRUCTURE OF MODERN CITIES

Gulzhigit Y. Toktoshov,

Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS,  
6, Ac. Lavrentiev Avenue, Novosibirsk, 630090, Russia.

E-mail: tgi\_tok@rambler.ru

Engineering infrastructure of modern cities represents a rather complex hierarchical system, which involves the structuring of the design process into separate subsystems taking into account the prospects of their development and reconstruction. While designing communications the technical and economic feasibility of their construction at the appropriate place should be considered, as it impacts the efficiency of future communication. In this regard, it is urgent to create specialized geographic information systems (GIS), allowing to estimate the projected cost of utilities prior to commencement of construction works, and to take into account the spatial location of the various utilities, their multi-level nature and interaction.

**The main aim of the study:** development of creation concept of the specialized GIS based on model hyper networks, allowing the designer or user to consider the spatial location of the various utilities, their multi-level nature and interaction in the organization and management of engineering infrastructure of cities.

**The methods used in the study:** grid method in the construction of terrain models in the form of a discrete analogue of the staging area; methods of graph theory to find the optimal routes for laying of engineering networks; methods of the theory of hyper networks to describe the multi-levelness of creation of engineering infrastructure of modern cities.

**The results.** The authors introduced a hyper network technology of creation of the specialized geographic information systems, which is based on the hypernetwork models and structuring of the design process into separate subsystems. The proposed approach, unlike traditional methods of creation of GIS-technologies, allows organizing optimal spatial placement of engineering utilities for various purposes at the stage of their design taking into account their interrelation and interdependence.

**The conclusions:** the proposed method of creation of the specialized GIS, which is based on the hypernetwork models, allows taking into account special features of the real terrain, the type and purpose of the designed communication.

### Key words:

Engineering infrastructure, location area, geographic information system, graph, hyper network.

### REFERENCES

1. Fry C. GIS in telecommunications. In: Longley P., Goodchild M., Maguire D., Rhind D. (Eds.). *Geographical information systems: management issues and applications*. Wiley, New York, 1999, vol. 2. pp. 819–826.
2. Waters N. Transportation GIS: GIS-T. In: Longley P., Goodchild M., Maguire D., Rhind D. (Eds.). *Geographical information systems: management issues and applications*. Wiley, New York, 1999, vol. 2. pp. 827–844.
3. Blair N., Hine J., Murtaza S., Bukhari A. Analysing the impact of network change on transport disadvantage: a GIS-based case study of Belfast. *Journal of Transport Geography*, 2013, vol. 31, pp. 192–200.
4. Meehan B. *Empowering electric and gas utilities with GIS*. Redlands, Environmental Systems Research Institute Publ., 2007. 280 p.
5. Kosyakov S.V., Gadalov A.B., Sadykov A.M. O podkhode k realizatsii raspredelennoy GIS dlya vedeniya edinoi karty inzhenernykh setey goroda [On the approach to the implementation of the distributed GIS for the management of common utilities city map]. *Vestnik IGEU*, 2014, no. 5, iss. 5, pp. 1–7.
6. Sadykov A.M. *Metody i algoritmy poiska i otsenki variantov razmeshcheniya tekhnicheskikh obektov na gorodskikh territoriyakh*. Dis. Kand. nauk [Methods and algorithms for search and assess options for placement of technical objects in the urban areas. Cand. Diss.]. Saint Petersburg, 2015. 161 p.
7. Subbotin S.A., Sarychev D.S., Ckvortsov A.V. *Integratsiya tekhnologiy GIS i SAPR pri sozdanii informatsionnoy sistemy avtomobilnykh dorog* [Integration of GIS and CAD to create an information system of highways]. *INTEREKSPLO GEO-SIBIR*, 2006, no. 1. Available at: <http://cyberleninka.ru/article/n/integratsiya-tehnologiy-gis-i-sapr-pri-sozdanii-informatsionnoy-sistemy-avtomobilnykh-dorog> (accessed 16 June 2015).
8. Sarychev D.S. Sovremennye informatsionnye sistemy dlya inzhenernykh setey [Modern information systems for engineering networks]. *Vestnik TGU*, 2003, no. 28, pp. 358–361.
9. Harabor D., Grastien A. Online graph pruning for pathfinding on grid maps. *Proceedings of the 25th National Conference on Artificial Intelligence (AAAI)*. San Francisco, 2011. pp. 1114–1119.
10. Melkumov V.N., Kuznetsov I.S., Kuznetsov R.N. Opredelenie optimalnogo marshruta trassy gazoprovoda na osnove kart stoimosti vliyayushchikh faktorov [Determination of the optimal route of the gas pipeline on the basis of the factors affecting the value of cards]. *Nauch. vestn. VGASU. Stroitelstvo i arkhitektura*, 2009, no. 1 (13), pp. 21–27.
11. Kristofides N. *Teoriya grafov. Algoritmicheskiiy podkhod* [Graph theory. Algorithmic approach]. Moscow, Mir Publ., 1978. 432 p.
12. Fillips D., Garsia-Dias A. *Metody analiza setey* [Methods of analysis network]. Moscow, Mir Publ., 1984. 496 p.
13. Frenk G., Frish I. *Seti, svyazi i potoki* [Networks, communications and flows]. Moscow, Svyaz Publ., 1978. 448 p.
14. Popkov V.K. Giperseti i strukturnye modeli slozhnykh system [Hypernetwork and structural models of complex systems]. *Matematicheskie i imitatsionnye modeli slozhnykh sistem. Sistemnoe modelirovanie*. Novosibirsk, 1981, pp. 26–48.
15. Popkov V.K. *Matematicheskie modeli svyaznosti* [Mathematical models of connectivity]. Novosibirsk, IVMiMG SO RAN Publ., 2006. 490 p.
16. Popkov V.K. Primenenie teorii S-gipersetey dlya modelirovaniya system setevoy struktury [Application of the theory of S-hypernetwork for modeling systems network structure]. *Problemy informatiki*, 2010, no. 4, pp. 17–40.
17. Popkov V.K. Strukturnye modeli mnogosloynnykh nestatsionarnykh system [Structural models of multi-layer non-stationary system]. *Trudy X Mezhdunarodnoy Aziatskoy shkoly-seminara «Problemy optimizatsii slozhnykh sistem»* [Proc. X Asian Int.



- Workshop on Optimization Problems of Complex Systems]. Kyrgyz Republic, 2015, part 2. pp. 562–573.
18. Toktoshov G.Y. Gipersetevoy podkhod k proektirovaniyu inzhenernykh setey [Hypernetwork approach to designing of engineering networks]. *Rossiyskaya nauchno-tehnicheskaya konferentsiya «Informatika i problemy telekommunikatsiy»* [Russian Science and Techn. Conf. Information and telecommunications issues]. Novosibirsk, 2011, vol. 1. pp. 167–170.
  19. Abramov Yu.A., Tarasenko A.A. Optimizatsiya marshruta dvizheniya v usloviyakh peresechennoy mestnosti [Route optimization movement in rough terrain]. *Naukoviy visnik budivnitstva*, 2009, iss. 52, pp. 401–407.
  20. Toktoshov G.Y. Giperseti v modelirovanii i optimizatsii sovmeshchennoy prokladki podzemnykh inzhenernykh kommunikatsiy [Hypernetworks in modeling and optimization of the combined laying of underground utilities]. *Problemy informatiki*, 2014, no. 1 (22), pp. 15–23.
  21. *SNiP II-89–90. Generalnye plany promyshlennykh predpriyatiy* [Building regulations II-89–90. General plans of industrial enterprises]. Available at: <http://www.skonline.ru/doc/784.html> (accessed 23 May 2015).

*Received: 6 July 2015.*