

## Моделирование и анализ систем энергоснабжения территорий методами зонирования и агрегирования информации

С.В. Косяков, д-р техн. наук, А.М. Садыков, асп.

**Рассмотрен подход к реализации моделей для анализа пространственной структуры систем энергоснабжения урбанизированных территорий на основе методов агрегирования пространственной информации и зонирования, а также результаты реализации программных средств моделирования и анализа структуры систем энергоснабжения территорий в среде ГИС.**

*Ключевые слова:* пространственное моделирование, зонирование, агрегирование информации, геоинформационная система.

## Modelling and Analysis of Power Supply Systems of Territories with Zoning Methods and Information Aggregation

S.V. Kosyakov, Doctor of Engineering, A.M. Sadykov, graduate student

**The mode of realization of models for the analysis of power supply areas systems structure of the urbanized territories on the aggregation methods of the areas information and zoning foundation, and the results of realization of software modeling and the analysis of power supply systems structure of territories with GIS-application is considered.**

*Keywords:* spatial analysis, zoning, information aggregation, geoinformation system.

Развитие систем энергоснабжения крупных городов и регионов является частью процесса развития соответствующих территорий в целом и во многом определяет их потенциал. Возможности технологического присоединения к различным сетям энергоснабжения являются одним из наиболее значимых факторов инвестиционной привлекательности предлагаемых властями к освоению земельных участков. В рыночных условиях управление взаимообусловленными процессами планирования развития энергетики и территории осуществляется децентрализованно. В процессах планирования и принятия решений участвуют органы государственной власти и местного самоуправления, различные энергетические компании, имеющие собственные коммерческие интересы, негосударственные инвесторы, использующие территорию для осуществления экономической деятельности. В таких условиях существенно возрастает роль информированности всех участников процесса о пространственной структуре транспортно-энергетического комплекса, возможностях использования альтернативных видов и источников энергии, альтернативных способов ее потребления и доставки, прогнозах и планах развития энергетических мощностей и потребителей. Отсутствие достоверной и доступной информации приводит к сложности и субъективности оценки реального потенциала и перспектив использования инвестиционных площадок как со стороны инвесторов, так и со стороны органов власти, увеличивает экономические риски и, как следствие, сдерживает развитие территорий.

В настоящее время в различных организациях, в том числе и в органах местной и региональной власти, в рамках реализации мероприятий по энергосбережению, реформированию коммунального хозяйства, статистического учета накоплен большой объем разнообразной фактографической информации об источниках и потребителях различных видов энергии и ресурсов. Однако получение целостной картины энергообеспечения территории и тем более моделирование ситуаций для оценки вариантов развития систем потребления и энергоснабжения с учетом возможностей альтернативного использования различных видов ресурсов на конкретных участках территории остаются нерешенной задачей. Наглядно представить ситуацию с энергоснабжением на территории и довести до сколь угодно широкого круга заинтересованных лиц возможно с использованием средств моделирования в среде геоинформационных систем и сети Интернет. Ниже рассмотрен подход к реализации моделей для анализа пространственной структуры систем энергоснабжения территорий на основе методов агрегирования пространственной информации и зонирования, а также результаты реализации отдельных компонентов разработанной нами среды пространственного моделирования на базе программного обеспечения геоинформационной системы ArcGIS. Рассмотренный подход является развитием работ [1, 2].

В основе подхода лежат методы зонирования и агрегирования пространственной информации. В современной практике государственного управления утвердилось поня-

тие зонирования как деления территории на зоны при градостроительном планировании развития территорий и поселений с определением видов и ограничений градостроительного использования установленных зон. Это один из основных инструментов законодательного влияния властей на процессы развития территории, который применяется в целях установления регламентов использования земель и оценок их стоимости для налогообложения. В данном случае зонирование рассматривается в более широком смысле, как это принято в геоинформатике. С позиций пространственного моделирования под зонированием понимают построение новых площадных объектов – участков территории, однородных в смысле выбранного критерия или группы критериев [3].

Энергоснабжение и транспортное обслуживание территорий обеспечиваются с помощью инженерных сетей: дорог, трубопроводов, линий электропередачи. Моделирование и анализ каждой из таких систем осуществляется на основе сетевых моделей в виде графов, узлами которых являются источники, потребители и элементы сетевого оборудования. Систему энергоснабжения в этом случае представляют кортежем:

$$S = \langle W, Q, U, R, E \rangle, \quad (1)$$

где  $W$  – множество источников ресурсов;  $Q$  – множество потребителей ресурсов;  $U$  – множество элементов транспортировки ресурсов;  $R$  – множество отношений между элементами множеств  $W$ ,  $Q$ ,  $U$  и  $B$ ;  $E$  – множество операций (процедур, методов), которые могут выполняться над элементами множеств  $W$ ,  $Q$ ,  $U$  и  $R$ .

Имея полную и точную информацию о характеристиках всех элементов такой модели, можно использовать точные инженерные методы расчетов режимов работы сети. Однако построение такой модели составляет определенную проблему. Еще более сложной проблемой является анализ взаимного влияния режимов работы различных видов сетей, работающих на одной территории, на общих потребителей. Сложность в данном случае определяется отсутствием формализованных связей между режимами работы разных видов сетей, которые позволили исследовать комплекс систем с помощью инженерных расчетов.

Рассматриваемый подход основан на гипотезе о том, что отдельные обобщенные свойства различных систем энергоснабжения можно представить унифицировано: в виде множества зон, которым сопоставлены агрегированные свойства частей исследуемых систем, и связей между зонами, выявленных аналитическими методами. При этом возможно абстрагироваться от реальной структуры сетей и исследовать наиболее общие свойства и закономерности распределения энерго-

ресурсов на основе неполной, обобщенной или прогнозной информации, а также совместно анализировать различные виды систем методами многокритериального анализа.

Подобные подходы давно и широко применяются при моделировании экономических аспектов развития энергетики и в государственном планировании в масштабах страны. Обзор работ в этой области приведен в монографии [4]. Однако в данных подходах агрегирование информации осуществляется по отраслевым факторам, видам ресурсов, способам их производства и потребления, видам оборудования и т.д. Пространственные аспекты в моделях учитываются опосредованно, обычно путем агрегирования информации на уровне регионов. Это обусловлено ориентацией на использование источников информации государственных информационных систем, в первую очередь органов государственной статистики.

Задачи планирования, прогнозирования и экономической оценки на региональном и муниципальном уровнях требуют построения аналогичных моделей для анализа вариантов развития территории. Однако урбанизированные территории являются крайне неоднородной средой для прокладки коммуникаций и размещения объектов, что требует учета пространственных факторов при моделировании. Применение ГИС-технологий дает возможность включить в процедуры анализа методы пространственного моделирования и на этой основе совместить подходы экономико-математического моделирования, градостроительного проектирования и анализа инженерных сетей для поддержки принятия решений. Кроме того, представление информации о свойствах территориальных систем в виде карт зонирования обеспечивает максимальную наглядность в представлении исходных данных и результатов моделирования, а также позволяет видеть ситуацию на территории в целом с выделением наиболее критичных участков по комплексу критериев.

Пример практического использования карт зонирования, представляющих инвесторам информацию о пространственном распределении имеющихся мощностей для присоединения к электрическим сетям, имеется в открытом доступе в сети Интернет (<http://www.nne.elektra.ru/karta/index.php>) на сайте компании Филиал «Нижновэнерго» ОАО «МРСК Центра и Приволжья» [5]. На данной карте представлены зоны обслуживания электрических подстанций в Нижегородской области, разбитые на четыре класса по уровню их загрузки. Каждый класс отображается на карте своим цветом, по принадлежности параметра загруженности к заданному диапазону значений. Подобные карты могут быть построены для систем газо-, водо-, теп-

лоснабжения и любых других видов обеспечения ресурсами. На рис. 1 приведен фрагмент тестовой карты зонирования территории г. Иванова, сформированной нами в среде геоинформационной системы ArcGIS с зонами обслуживания электрических подстанций (показаны только границы зон, их параметры не отображаются).

Приведенные примеры иллюстрируют возможность предоставления пространственной информации о структуре систем энергоснабжения для широкого круга заинтересованных лиц. При этом они представляют статичные пространственные данные, полученные путем агрегирования земельных участков по единственному критерию их принадлежности к одному источнику энергоснабжения (электрические подстанции в данном случае рассматриваются как источники электроэнергии низкого напряжения).

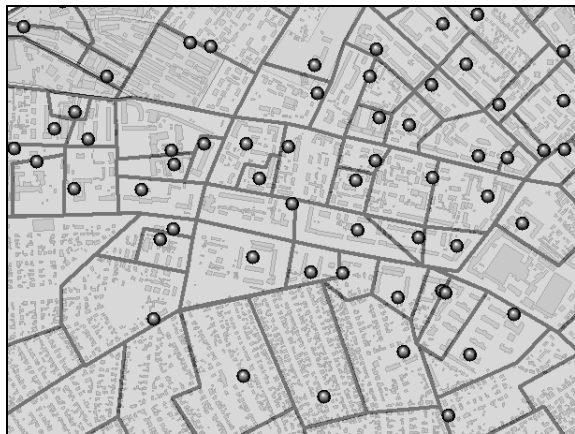


Рис. 1. Модель зонирования по возможности присоединения к газовым сетям

Для решения задач анализа и моделирования процессов развития территории в целом требуются многокритериальные подходы и агрегирование по множеству параметров. В этом случае при зонировании следует учитывать характеристики источников различных видов энергоресурсов и пространственную структуру распределения потребителей этих видов энергоресурсов.

Разработанный подход предусматривает построение моделей комплексного зонирования территории по критериям условий энергоснабжения и потребления на различных участках с возможностью учета экологических и градостроительных ограничений, а также проведение анализа на этих моделях в оптимизационной постановке.

В задаче комплексного зонирования учитываются два вида отношений между элементами анализируемых систем:

1) отношения, обусловленные технологическими процессами и пространственными связями внутри каждого вида инженер-

ных сетей, т.е. отношения определенной предметной области;

2) пространственные отношения элементов систем из различных предметных областей, обусловленные взаимной близостью или совпадением в пространстве.

Наиболее адекватным методом зонирования для рассматриваемого класса задач представляется агрегирование земельных участков, представленных в картах кадастрового деления. Кадастровые карты являются открытым источником и публикуются для просмотра в сети Интернет. В сочетании с адресной информацией о местоположении источников и потребителей, а также с нанесенными на карты схемами коммуникаций они дают исходные данные для пространственного агрегирования. При этом границы зон для всех видов анализируемых систем будут определены на единой сети границ земельных участков, и не будут возникать мелкие перекрытия полигонов разных видов систем, «зашумляющие» комплексную модель. Ограничения градостроительного и экологического характера, которые определяются генеральными планами развития территорий и графическими документами правил землепользования и застройки, также являются моделями зонирования, которые должны быть согласованы с кадастровыми картами.

Математическая модель  $M_i$  каждого вида энергоснабжения или системы экологических и градостроительных ограничений имеет вид

$$M_i = \langle P_i, A_i \rangle, \quad (2)$$

где  $i$  – номер системы (например, 1 – газоснабжение, 2 – теплоснабжение, 3 – электроснабжение и т.д.);  $P_i$  – множество зон (полигонов на карте);  $A_i$  – множество атрибутов.

Множество полигонов  $P_j = \{p_j \mid j = \overline{1, J}\}$ , где  $J$  – количество зон на карте, образуют непрерывное покрытие территории:

$$\bigcap_{j=1}^J p_j = \emptyset, \quad \bigcup_{j=1}^J p_j = \hat{p},$$

где  $\hat{p}$  – полигон, охватывающий всю исследуемую территорию.

Границы каждого полигона  $p_j$  определяются как подмножество  $z_j \in Z$  множества границ существующих земельных участков  $Z = \{z_k \mid k = \overline{1, K}\}$ , где  $K$  – общее количество земельных участков на территории. Множество атрибутов  $A_i = \{a_n \mid n = \overline{1, N}\}$  задает таблицу, в которой для каждого полигона определяется вектор значений атрибутов.

Таким образом, первый этап построения комплексной модели анализа территории можно представить множеством функций пространственного агрегирования  $F = \{f_j\}$ :

$$f_j(Z, W_j, Q_j, U_j, R_j) \xrightarrow{G} M_j, \quad (3)$$

где  $W_i, Q_i, U_i, R_i$  – множества атрибутов источников, потребителей, элементов коммуникаций и отношений объектов  $i$ -й системы энергоснабжения;  $G$  – множество атрибутов, использующихся в критериях анализа.

Данные функции реализуются в ГИС. Конкретный способ построения модели зонирования по критериям предметной области определяется набором параметров, характеризующих зоны. В простых случаях зоны могут формироваться пользователем «вручную», на основе визуального анализа местоположения и параметров изображенных на карте источников, потребителей и коммуникаций в среде ГИС. Процесс построения границ зон и вычисления агрегированных параметров для моделей зонирования систем энергоснабжения может быть автоматизирован на базе программных средств ГИС. Отдельные методы и алгоритмы автоматизированного построения зон с использованием цифровых карт сетей энергоснабжения рассмотрены в [6].

При агрегировании земельных участков по типу потребителей (жилищная застройка, административные кварталы, промышленные объекты, объекты смешанного типа потребления и т.д.) могут определяться такие агрегированные параметры, как суммарный объем потребления ресурса в зоне, усредненный график потребления и др.

Комплексная модель зонирования  $M^*$  образуется путем пересечения границ имеющихся зон множества  $\{M_i\}$  и объединения их атрибутов:

$$F(\{M_i\}) \rightarrow M^*, \quad (4)$$

$$M^* = \langle P^*, A^* \rangle,$$

$$P^* = \bigcap_{i=1}^l P_i,$$

$$A^* = \bigcup A_i.$$

В ГИС эта операция осуществляется автоматически, с использованием средств оверлея слоев цифровой карты. На рис. 2 показан пример, в котором на зоны обслуживания подстанций, приведенные на рис. 1, наложены зоны обслуживания котельных и газораспределительных подстанций низкого давления. Пересечение границ этих зон дает новое покрытие, элементам которого сопоставлены атрибуты всех исходных слоев.

Рассмотрим простой пример решения задачи анализа участка территории, представленного в виде модели зонирования на рис. 2. Для простоты будем считать, что нас интересует только один атрибут величины резерва мощности для подключения в зоне к соответствующему виду энергоснабжения, а исходные карты зонирования по снабжению электроэнергией, газом и теплом включают по две зоны. Комплексная модель включает 6

зон. При этом каждая зона характеризуется комбинацией значений трех атрибутов:

$A_1$  – резерв по газу ( $\text{м}^3/\text{ч}$ );

$A_2$  – резерв по теплу ( $\text{Гкал}/\text{ч}$ );

$A_3$  – резерв по эл. энергии ( $\text{кВт}\cdot\text{ч}$ ).

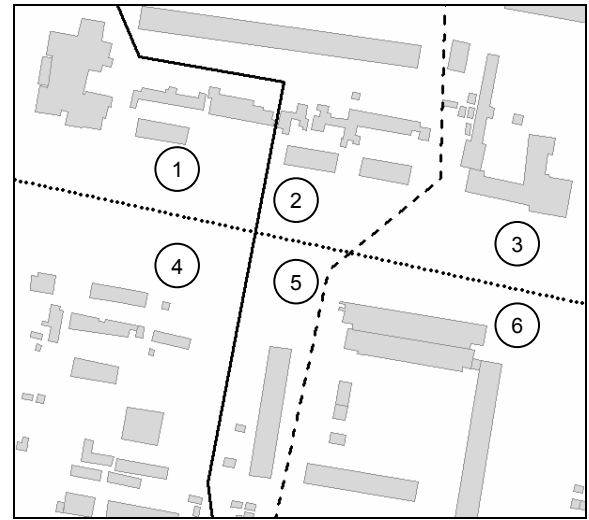


Рис. 2. Модель комплексного зонирования по различным видам энергоснабжения: — — — границы зон обслуживания котельных; - - - границы зон обслуживания газораспределительных подстанций; ..... – границы зон обслуживания трансформаторных подстанций

Значения атрибутов представляются в таблице атрибутивных данных слоя. Предположим, что атрибуты принимают значения согласно таблице. Последняя строка таблицы – оценка по заданному критерию, которая определяется в результате анализа.

#### Пример данных для оценки зон

Атрибут	Значение атрибута для зон					
	1	2	3	4	5	6
$A_1$	9	9	20	9	9	20
$A_2$	0	15	15	0	15	15
$A_3$	5	5	5	30	30	30
Оценка	$V_1$	$V_2$	$V_3$	$V_4$	$V_5$	$V_6$

Задавая различные критерии и ограничения, можно решать задачи оптимального выбора площадок для размещения объектов. Например, найти участки с максимальным резервом по мощности электросети при наличии резерва в сети теплоснабжения не менее 5 и по газу не менее 15:

$$i = F(A^*), A_3 \rightarrow \max, A_1 > 5, A_2 > 15. \quad (5)$$

Определение оценок в данном случае осуществляется путем проверки условий и значения  $A_3$  для всех зон модели. В результате получаем  $V_1 = V_2 = V_4 = V_5 = 0$ , что означает, что эти участки не проходят по ограничениям.  $V_3 = 5, V_6 = 30$ . Из этого следует, что участок с номером 6 является наилучшим по заданному критерию. Если задать три критерия  $A_1 \rightarrow \max, A_2 \rightarrow \max, A_3 \rightarrow \max$ , то при

имеющихся значениях параметров получим тот же результат.

В реальных условиях число зон может составлять сотни, а атрибутов – десятки. При этом выбор наилучших решений становится неочевидным. При многокритериальной постановке в таком случае может быть построена область Парето, включающая несколько конкурирующих по разным критериям зон, либо использованы различные методы свертки критериев. В задачах экономического анализа и планирования атрибуты зон могут быть сведены к единым стоимостным показателям или единицам условного топлива, что позволяет сводить комплексный анализ энергоснабжения территории к однокритериальной постановке.

Конечный пользователь системы моделирования работает с цифровой картой и видит результаты выборки или ранжирования в виде картограмм – тематических карт, на которых цветом или другим графическим способом отображаются результаты моделирования. Отображение результатов ранжирования, полученных в рассмотренном примере, показано на рис. 3. Яркость заливки отражает предпочтительность зоны, в которой следует размещать объект при заданных условиях.



Рис. 3. Результаты анализа территории по заданным критериям комплексной энергообеспеченности

Экспериментальный образец специализированной ГИС для решения задач анализа структуры системы энергоснабжения территории реализован на базе программного обеспечения ArcGIS 10 компании ESRI (<http://www.esri.com>, <http://www.esri-cis.ru>) с использованием встроенных средств программирования на языке Python. Он включает комплекс процедур, позволяющих формировать модели зонирования, проводить анализ и публиковать его результаты в сети Интернет. При этом использованы имеющиеся в среде ArcGIS многочисленные инструменты для

операций со слоями, полигонами и таблицами атрибутов пространственных объектов.

Исходными данными для построения модели являются:

- базы данных источников и потребителей энергоресурсов;
- схемы инженерных сетей на картографической основе;
- карта адресного реестра;
- карта землепользования;
- графические материалы генерального плана и/или правил землепользования и застройки;
- любые другие картографические материалы по территории.

Базы данных источников и потребителей должны включать в качестве атрибутов адреса объектов. Это позволяет нанести их на карту в автоматическом режиме с использованием средств адресного геокодирования, входящих в состав инструментов анализа ГИС. Под потребителями в данном случае понимают жилые здания и комплексы зданий промышленных предприятий. При отсутствии данных о потреблении в непромышленном секторе они могут быть получены путем расчетов по нормативам на основе представленных в картах характеристик зданий (по площади, числу жителей и т.п.).

Наиболее сложной в плане получения данных является процедура установления связей источников с потребителями. Эта информация может быть получена из баз данных о потребителях, если в них для каждого потребителя непосредственно указан источник, либо путем анализа схем инженерных коммуникаций. Как правило, достоверные сведения по этому аспекту можно получить в предприятиях коммунального хозяйства или энергоснабжения.

Процесс построения комплексной модели в среде ArcGIS включает несколько процедур моделирования, реализованных с помощью встроенной системы моделирования ModelBuilder. На рис. 4 показан процесс построения карты зонирования для системы теплоснабжения. По такому же сценарию создаются карты зонирования по электроэнергии и газоснабжению. На рис. 5 представлен процесс построения комплексной модели зонирования из полученных карт по отдельным видам энергоснабжения. В нотации программы ModelBuilder элементы в виде эллипса означают наборы данных, а прямоугольные блоки – программно реализованные функции ArcGIS.

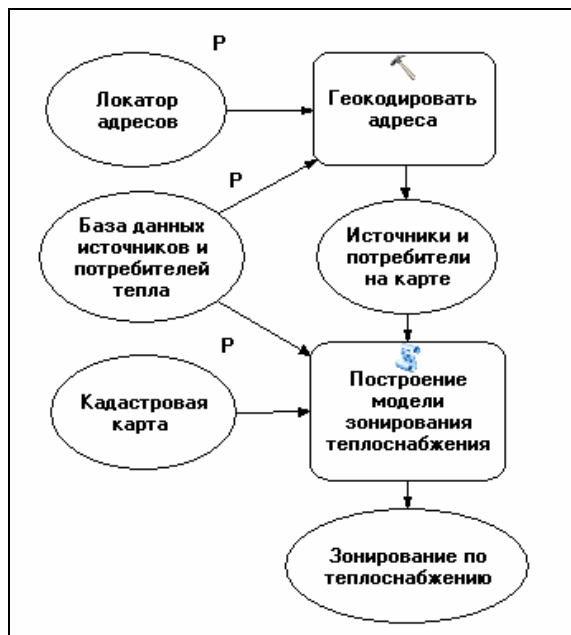


Рис. 4. Модель процесса построения карты зонирования системы теплоснабжения в ModelBuilder

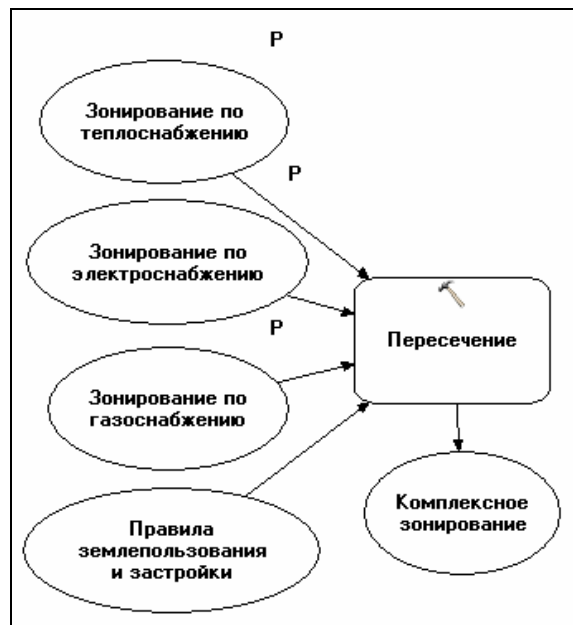


Рис. 5. Модель процесса построения карты комплексного зонирования энергоснабжения территории в ModelBuilder

Построенные таким способом модели могут использоваться широким кругом заинтересованных лиц для проведения анализа на специализированных сайтах в сети Интернет. ArcGIS 10 обеспечивает такую возможность. При этом пользователям могут быть представлены средства, которые позволяют не только выполнять поисковые запросы, но и, размещая собственные объекты с заданными характеристиками, видеть изменение картины распределения ресурсов. Тем самым можно сравнивать несколько вариантов размещения как для одного, так и для множества различных объектов.

С помощью разработанных методов и средств пространственного моделирования построена экспериментальная модель зонирования системы энергоснабжения г. Иванова. При построении модели использованы карты землепользования, поддерживаемые в информационной системе Ивановского городского комитета по управлению имуществом [7], данные генерального плана развития города, цифровые схемы различных коммунальных сетей, базы данных информационной аналитической системы топливно-энергетического баланса региона [7] и ряд других источников данных. На рис. 6 приведен пример просмотра модели в Интернет-браузере на экспериментальном сайте, поддерживаемом средствами ArcGIS Server.

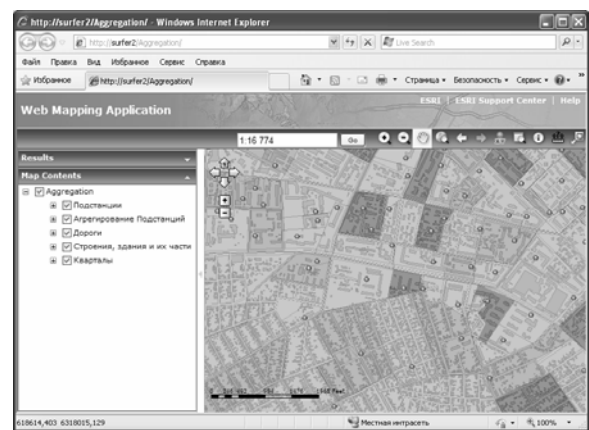


Рис. 6. Пример использования модели в сети Интернет

## Заключение

Разработанный подход ориентирован на задачи экономического анализа, прогнозирования и планирования энергетического хозяйства регионов и муниципальных образований. Он ориентирован в первую очередь на структуры в составе региональных и местных властей, которые стремятся создавать условия для развития инвестиционной привлекательности за счет повышения уровня информационного взаимодействия власти, энергетических компаний и инвесторов. Разработанные методы и средства комплексного анализа структуры системы энергоснабжения территории предполагают дальнейшее развитие за счет формализации и учета при моделировании различных видов связей между зонами. Такие модели и методы разрабатываются авторами в рамках реализации программного комплекса «ГИС моделирования и анализа территориально распределенных технических систем».

## Список литературы

1. Косяков С.В., Раева Т.Д., Карпов М.А. Автоматизация процессов принятия решений в области долгосрочного инвестиционного планирования электроэнергетики.

гетических систем на основе ГИС-технологий // Вестник ИГЭУ. – 2003. – Вып. 3. – С. 131–136.

2. **Косяков С.В.** Методы решения задач планирования развития пространственной структуры городских энергетических сетей на основе ГИС-технологий // Вестник ИГЭУ. – 2003. – Вып. 6. – С. 77–83.

3. **Основы** геоинформатики: учеб. пособие для студ. вузов в 2 кн. Кн. 1 / Е.Г. Капралов, А.В. Кошкарев, В.С. Тикунов и др.; под ред. В.С. Тикунова. – М.: Изд. центр «Академия», 2004.

4. **Методы** и модели прогнозных исследований взаимосвязей энергетики и экономики / Ю.Д. Кононов, Е.В. Гальперова, Д.Ю. Кононов и др. – Новосибирск: Наука, 2009. – 178 с.

5. **Карта** загрузки подстанций «Нижновэнерго». Сведения об общей пропускной способности подстанций 35–110 кВ филиала «Нижновэнерго» / Интrent-ресурс: <http://www.nne.elektra.ru/karta/index.php>

6. **Косяков С.В., Гадалов А.Б., Фомина О.В.** Метод построения моделей территориального агрегирования сетей для анализа пространственной структуры систем энергоснабжения городов // Вестник ИГЭУ. – 2005. – Вып. 4. – С. 118–122.

7. **Комплексная** автоматизация процессов управления землей и имуществом муниципального образования на основе корпоративного Интернет-портала / С.В. Косяков, Д.Ф. Абдулов, Е.А. Дербенева и др. // Вестник ИГЭУ. – 2010. – Вып. 3. – С. 85–90.

8. **Ратманова И.Д., Коровкин С.Д., Железняк Н.В.** Информационная модель топливно-энергетического комплекса как основа анализа энергетической безопасности региона // Информационные технологии. – 2009. – №9 – С. 9–15.

*Косяков Сергей Витальевич,*  
ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой программного обеспечения компьютерных систем,  
адрес: г. Иваново, ул. Рабфаковская, д. 34, корп. Б, ауд. 307,  
телефон (4932) 26-98-60,  
e-mail: poks@poks.ispu.ru

*Садыков Артур Мунавирович,*  
ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
аспирант кафедры программного обеспечения компьютерных систем,  
телефон (4932) 26-98-60,  
e-mail: poks@poks.ispu.ru