

Д.С. Сарычев, А.В. Скворцов, С.Г. Слюсаренко

## ПРИМЕНЕНИЕ ГРАФОВЫХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ АНАЛИЗА ИНЖЕНЕРНЫХ СЕТЕЙ

Рассматриваются задачи анализа инженерных сетей, решаемые с использованием графовых моделей. Для упрощения решения таких задач используется универсальная модель. Описывается применение этих моделей для решения ряда задач в информационных системах инженерных сетей на базе геоинформационной системы ГрафИн 4.0.

Одной из основных задач, решаемых при анализе инженерных сетей, является поиск и анализ топологических связей в территориально распределенных объектах. Одним из средств такого анализа является построение графов сети, или графовых моделей сети. К классическим задачам, решаемым средствами теории графов, относятся сетевые, транспортные и многие другие инженерные задачи [1–3].

Сам характер инженерных сетей, большая пространственная разобщенность, сосредоточение основных характеристик как в точечных узлах, так и в протяженных объектах оправдывает применение графовых моделей для имитации и анализа. В силу того, что функционирование сетей подчиняется последовательным принципам, имеет место возможность интеграции отдельных элементов сети в подсистемы. Кроме того, сами задачи анализа выдвигают требования к выявлению топологической связности объектов сети.

Инженерные сети направлены на передачу целевого продукта от источников к потребителям. Цепочки элементов сети, участвующие в передаче целевого продукта, образуют структуру сети.

### Задачи анализа инженерных сетей

В различное время авторами выполнялись многочисленные проекты по тематике инженерных сетей, включая разработку кадастров и имитационных моделей инженерных коммуникаций (электрических, водопроводных, тепловых, газовых, телефонных сетей, сетей водоотведения), расчеты режимов функционирования инженерных сетей, расчет транспортных сетей и другие. На основании анализа данных задач можно выделить несколько самых общих задач анализа. Рассмотрим наиболее часто встречающиеся.

– **Задача проверки связности.** Эта задача в терминах инженерных сетей звучит так: выяснить, какие объекты (или элементы сети) соединяются с данным, образуя непрерывную цепь передачи целевого продукта. Она должна решаться с учетом состояний элементов, разрешающих либо запрещающих передачу (коммутаторов), а также ограничений на направление движения и возможность соединения тех или иных элементов сети. Например, в электрических сетях это будет учет классов напряжений сопрягаемых линий передач, в водопроводных сетях – диаметров труб.

– **Задача выделения компонент связности.** Эта задача является более общей по отношению к задаче проверки связности. Для сетей эта задача формулируется так: найти все элементы сети, связанные с данным элементом непрерывной цепочкой передачи целевого продукта. Особенностью этой задачи является наличие дополнительных условий на включение элементов в рассмотрение. Так, например, в электрических задачах может требоваться анализировать только сети одного класса напряжений или количества фаз, в трубопроводах – сети, питающие один регион, в транспорте – дороги, по которым проложены определенные маршруты.

– **Задача выделения специфических компонент сети.** В данной задаче, помимо анализа типов

элементов сетей и их атрибутов, производится глубокий анализ топологии участков сети. Типичные задачи для электрических сетей – выделение набора элементов (компонент) сети, связанных друг с другом и имеющих один элемент определенного вида, через который подводится питание (фидер); для трубопроводных сетей – выделение частей сети, в которой возможно резервирование подачи жидкости; в транспортной сети – выделение части сети, из которой невозможно «вернуться».

– **Классические комбинаторные задачи на графах,** такие как поиск кратчайшего (с точки зрения некоторого условия) маршрута, проходящего через  $n$  точек, поиск  $n$  ближайших пунктов обслуживания.

– **Задача расчета установившегося потокораспределения.** Эта задача существенным образом использует рассмотрение сети как графа. Как подзадачи при решении такого типа задач могут использоваться все вышеперечисленные задачи.

– **Задача упрощения графа сети.** Это задача, при решении которой некоторые сопряженные элементы графа сети заменяются на один элемент, интегрирующий характеристики вошедших в него элементов.

– **Задача нахождения оптимального воздействия на сеть для достижения требуемых параметров сети.** Эти задачи всегда базируются на расчете установившегося потокораспределения. Кроме того, существенным является набор оптимизируемых параметров – если оптимизируется меньшая часть параметров сети, многие другие части сети можно упростить.

– **Задача нахождения пропорций питания.** Эта задача актуальна при выяснении, какую часть питания получают абоненты от тех или иных источников. Обычно для абонента, подключенного к двум источникам водоснабжения, требуется найти объем воды, потребляемый от каждого из них.

### Графовые модели инженерных сетей

Инженерной сетью называется система, предназначенная для передачи целевой продукции (воды, газа, электроэнергии, транспортных единиц) от источников к потребителям с помощью протяженных линий связи. В настоящее время получила распространение модель инженерной сети, базирующаяся на следующих предпосылках:

– сеть представляет собой систему взаимодействия большого числа подсистем трех типов: нагрузок или потребителей, активных источников, линий связи;

– каждая такая подсистема  $i$  характеризуется двумя величинами: последовательной (расходом, потоком)  $q_i$  и параллельной (потерей напора, напряжением)  $h_i$ , рядом параметров, а также выбранным направлением;

– в качестве потребителя в сети рассматривается эквивалентный участок, называемый фиктивным

(сток, заземление, потребитель) и направленный от какого-либо узла сети к точке с нулевым давлением или напряжением;

– линии связи (пассивные элементы) представляют собой протяженные участки сети. Сюда же относятся коммутирующие элементы и прочие элементы, последовательно участвующие в передаче целевой продукции.

Структура инженерной сети представляет собой граф, отражающий характер связи между подсистемами сети [4]. Общий поток целевой продукции, подаваемый в сеть источниками, равен общему расходу потребителей. В сети имеют место законы Кирхгофа: сумма расходов в любом узле сети равна нулю; сумма потерь напора (напряжения) по любому замкнутому циклу равна нулю.

Таким образом, модель сети представляет собой граф, ребрами которого являются подсистемы, состоящие из последовательно соединенных активных и пассивных элементов сети; подсистемы соединяются в узлах графа (графовая модель). На рис. 1 изображены участки водопроводной сети (а) и ее графовая модель (б).

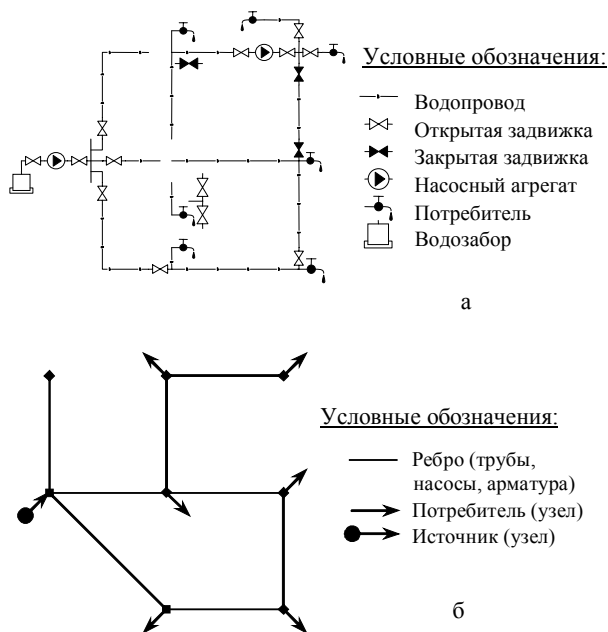


Рис. 1. Водопроводная сеть и ее графовая модель

При генерации графовой модели из ее схематического описания происходит следующее:

Шаг 1. Определяется роль элементов сети в графе и условия включения элементов в граф. Ребрами графа становятся: линии передач (ЛЭП, трубопроводы, дороги), специальное оборудование, участвующее в передаче целевой продукции (в трубопроводных сетях – компенсаторы, переходы, клапаны; в электрических – трансформаторы, дроссели; в транспортных – повороты, транспортные развязки). Вершинами графа становятся точки соединения элементов сети, «открытые» коммутаторы, специальные элементы (коллекторы, секции). Кроме того, некоторые элементы сети (тройники, крестовины, концентраторы, транспортные развязки) превращаются в набор вершин и ребер, что отражает характер связи между входами и выходами данных элементов.

Шаг 2. После генерации первичной графовой модели производятся задание модельных параметров для элементов графа сети и его упрощение. Всем ребрам графа

приписываются типы и характеристики элементов, их образовавших; узлам приписываются специальные параметры, влияющие на решение последующих задач анализа (например, для водопроводных сетей – высотная отметка, номинальное давление; для электрических – номинальное напряжение; для транспортных – производство или потребление).

Для упрощения модели и снижения размерности графа следует проводить упрощение графа. Для цепочки последовательных ребер, не имеющих ответвлений, в ряде случаев можно произвести эквивалентирование, т.е. замену цепочки на одно ребро, интегрирующее характеристики ребер, его составляющие. В случае, если параметры ребра являются несущественными при решении задачи анализа, следует устранить данное ребро, «склеив» вершины, которые оно соединяет.

Сгенерированная таким образом модель готова для решения на ее базе вышеперечисленных задач.

### Анализ электрических сетей

Описываемая технология была разработана авторами [5] и применена для построения информационно-расчетного комплекса электрических сетей на базе геоинформационной системы ГрафИн 4.0 (ГИС ГрафИн) [6], внедренного в ЗАО «Городские электрические сети» г. Томска.

Основными задачами, решаемыми при использовании данной модели, являются:

– **Выделение электрически связанных участков сети.** Данная задача является актуальной для диспетчеров, проектировщиков, при анализе причин перегрузок, анализе характеристик района, получающего питание, и другие. Для указанного пользователем участка сети выделяется компонента связности; затем для выделенных элементов графа сети проводится соответствие с элементами самой сети, ее образующей. Результатом решения этой задачи является список элементов сети, электрически связанных с данным. Важным условием задачи является селективный выбор элементов сети, участвующих в графе. Как правило, пользовательская задача формулируется так: «Найти все элементы и потребители сети определенного класса напряжения, соединенные с данным элементом». Кроме того, зачастую ставится условие на тип потребителей: наиболее актуальна эта задача для выявления приоритетных потребителей, таких как больницы, школы, специальные учреждения. Все это накладывает условия на включение элементов в граф. На рис. 2 продемонстрировано выделение подключенных абонентов сети 0,4 кВ.

– **Выделение фидеров.** Фидером является участок цепи, получающий питание от одной ячейки-источника. Для выделения фидера требуется произвести поиск (атрибутивный) ячеек-источников, затем построить компоненту связности таким образом, чтобы в нее не входили ячейки и секции данной подстанции источника и более высокие по рангу, а остальные сети – входили. Задача решается для всех ячеек-источников, что позволяет построить набор компонент связности и соответствующий им набор подсетей. На рис. 3 показан результат решения такой задачи – выделение цветом зданий в зависимости от того, каким фидером они питаются.

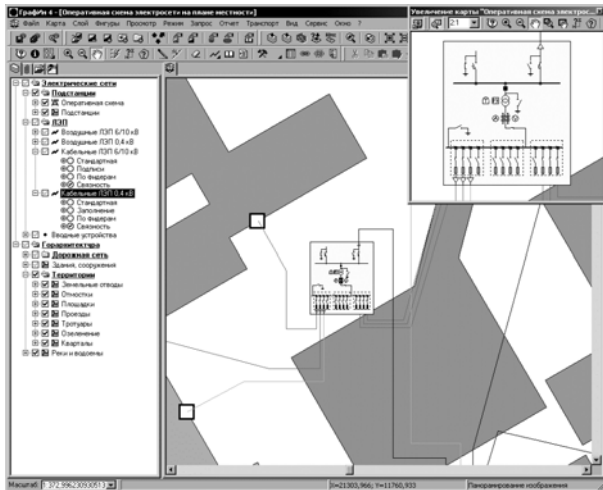


Рис. 2. Анализ связности сети 0,4 кВ

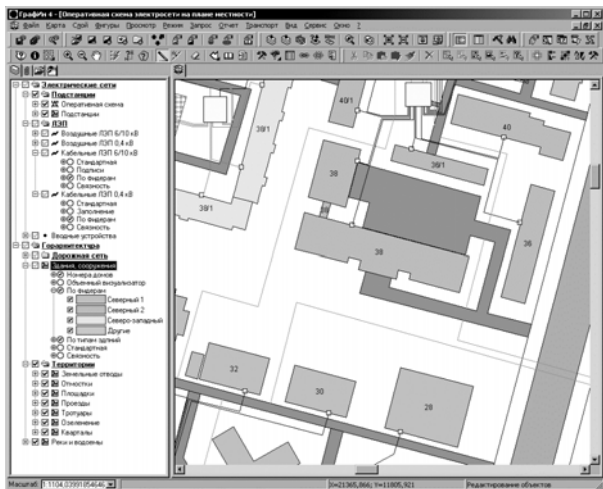


Рис. 3. Выделение электрических фидеров

– **Поиск возможного резервирования.** Для участка сети, имеющего в данный момент подключение, требуется найти резервное подключение на случай, если указанное подключение будет отсутствовать. Для решения такой задачи строятся два графа – один граф не учитывает отключенные коммутаторы (наиболее полный граф для данной сети), а другой – учитывает (реальный граф сети). Затем для участка сети производится удаление «аварийного» питающего ребра в реальном графе сети. Задачей является поиск ребер в наиболее полном графе сети, через которые данный участок все же сможет получать питание.

– **Построение графа сети,** используемого как базовая модель при расчете установившегося режима электрической сети. При решении данной задачи производятся следующие операции. Во-первых, строится полный граф сети, причем элементам графа ставятся в соответствие элементы сетей, из которых те образованы. Затем производится агрегация параметров элементов: для цепочки последовательно соединенных ребер графа, образованных однотипными элементами сетей, производится замена на одно ребро, которому ставятся в соответствие интегрированные параметры (например, активное и реактивное сопротивление) элементов, его образующих. Далее, на этапе подготовки к расчету, производится правильная нумерация вершин графа [7] при помощи поиска в ширину, после чего сформированная таким образом графовая модель используется при расчете. После вычислений производится выведение результатов вычислений на схему – при этом используется сопоставление элементов графа и исходных элементов сети, его образовавших. На рис. 4 приводится пример расчетной схемы, для которой строится граф.

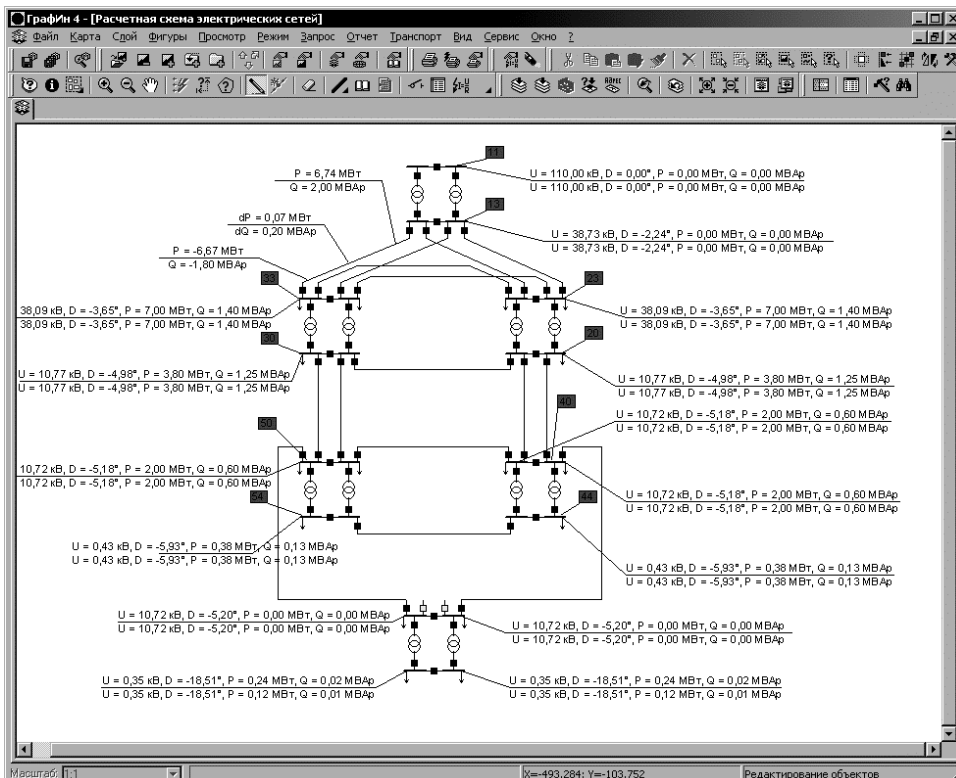


Рис. 4. Расчет схемы, представленной графом

## Анализ водопроводных сетей

Описываемая технология применена для построения информационно-расчетного комплекса водопроводных сетей на базе ГИС ГрафИн, внедренного на предприятиях «Томский водоканал» и МУП «Северский водоканал». Задачи, решаемые при использовании данной системы, являются аналогичными к задачам, решаемым при анализе электрических сетей: выделение гидравлически связанных участков, выделение питающих коллекторов, поиск резервирования, построение графа сети для расчета гидравлических режимов. Для оптимизации процедуры расчета предлагается выделять те части сети, которые являются древовидными.

### – Задача выделения односвязных частей графа.

Эта задача применяется, во-первых, для снижения трудоемкости расчета гидравлического режима, во-вторых, для прямого определения нагрузок тех или иных «кустов» потребителей. Расчет гидравлического режима для односвязного графа является тривиальной задачей. Соответственно, перед общим расчетом авторами предлагается убрать из графа односвязные участки, ведущие к потребителям (деревья), заменив их суммарной нагрузкой в узлах, к которым подключены данные деревья. После этого следует произвести расчет для убранных деревьев, основываясь на гидравлических параметрах узлов, их питающих. Так как гидравлические сети являются в основном односвязными и лишь на верхнем уровне имеют сложную циклическую структуру (для городского водоканала – до 90 % узлов сети лежат на ее разомкнутых частях), такое упрощение естественно приводит к снижению трудоемкости расчета потоко-распределения. Следует, однако, оговориться, что односвязные участки сети, имеющие в своем составе источники, не могут быть эквивалентированы подобным образом. На рис. 5 приведен фрагмент городской водопроводной сети, в которой при помощи разработанного

авторами алгоритма выделены «древовидные» участки, эквивалентированные для снижения размерности задачи расчета.

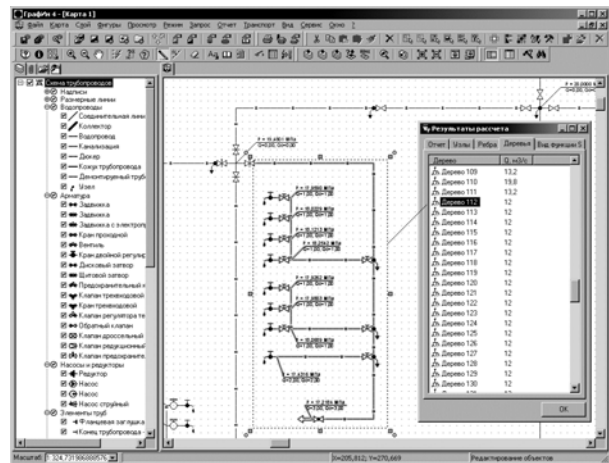


Рис. 5. Выделение «древовидных» участков водопроводной сети при гидравлическом расчете

### – Задача оптимального воздействия на сеть для достижения требуемого режима.

Это довольно общая постановка задачи. На данный момент авторами разрабатывается метод установки оптимальных параметров насосов подземного водозабора для предотвращения нежелательного подпора одной скважины другими. На рис. 6 показана схема подземного водозабора, имеющего радиальную структуру расположения скважин. При решении задачи строится древесный граф, корнем которого будет общий коллектор, а листьями – скважины. После проведения правильной нумерации вершин требуемый напор коллектора распространяется в порядке нумерации, с учетом его падения, к листьям. По значениям давлений листьев задаются рабочие параметры скважинных насосов и регулирующих задвижек.

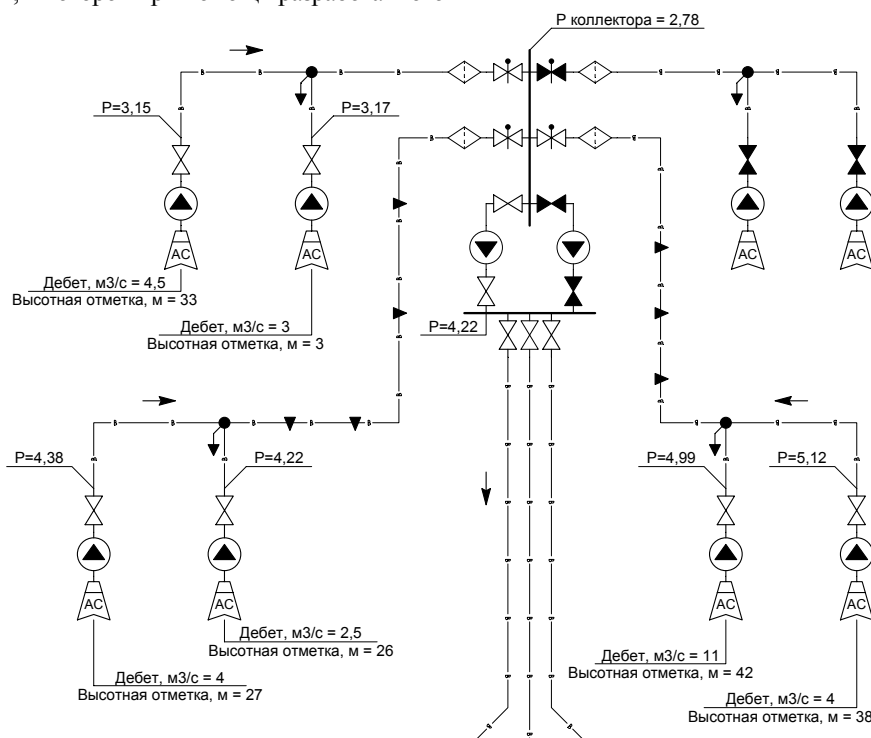


Рис. 6. Схема и режим подземного водозабора

## Анализ транспортных сетей

Разработанные авторами графовые модели были применены при создании пакета транспортных задач в ГИС ГрафИн [8]. В данном пакете решается ряд классических комбинаторных задач, решаемых в условиях наличия дорожной сети: кратчайший обход пунктов, поиск ближайшего пункта обслуживания. Кроме того, решается набор задач, характерных для проектирования и управления транспортной сетью: расчет пассажиропотоков и транспортных районов.

Отличительной чертой графов транспортных сетей является их ориентированность. Кроме того, при построении графа дорожной сети необходимо учитывать особенности точек соединения дорог (перекрестков) – стоимость поворотов в ту или иную сторону, возможность поворота, разворота или проезда. На рис. 7 приведен пример такого сложного поворота.

### Заключение

Использование графовых моделей инженерных сетей позволяет легко решать целый ряд задач анализа. Строя ту или иную графовую модель одной и той же сети, можно, используя классические алгоритмы обработки графов, решать разнообразные аналитические задачи.

Характерным является то, что графовые модели позволяют существенно облегчить решение таких задач, как расчет установившегося потокораспределения, оптимизация работы сети. Графовые модели позволяют избавиться от применения тяжеловесных прямых алге-

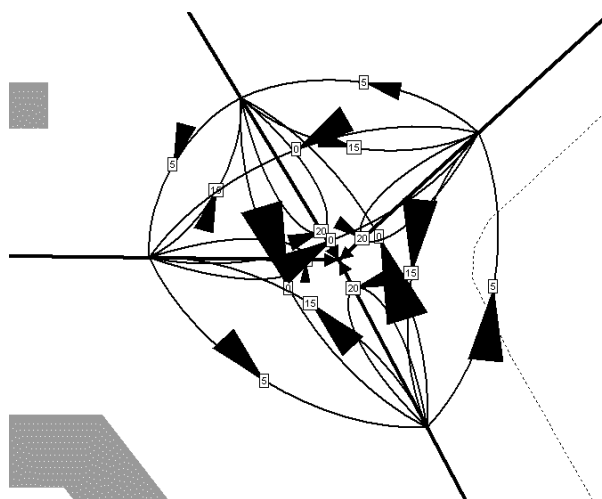


Рис. 7. Стоимости поворотов

браических методов решения таких задач и применять иные методы, базирующиеся на графах. Кроме того, графовые модели позволяют в ряде случаев существенно снижать размерности расчетных задач.

Применение графовых моделей позволяет выдвигать новые практические задачи анализа сетей, которые без их использования трудно описать формально. Это, например, поиск возможного резервирования. Такие проблемы приводят к новым алгоритмическим задачам теории графов.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Кошкарёв А.В., Тикунов В.С. Геоинформатика. М.: Картгеоцентр-Геодезиздат, 1993. 213 с.
2. Цветков В.Я. Геоинформационные системы и технологии. М.: Финансы и статистика, 1998. 288 с.
3. Бутковский А.Г. Обзор некоторых новых направлений, идей и результатов в проблеме управления системами с распределенными параметрами // Изв. АН СССР. Техн. кибернетика. 1983. С. 112–122.
4. Евдокимов А.Г., Тевяшев А.Д., Дубровский В.В. Моделирование и оптимизация потокораспределения в инженерных сетях. М.: Стройиздат, 1990. 368 с.
5. Скворцов А.В., Сарычев Д.С. Технология построения и анализа топологических структур для ГИС и САПР // Наст. журн.
6. Скворцов А.В. Геоинформационная система ГрафИн 4.0 и ее применения // Наст. журн.
7. Ахо А., Хопкрофт Д., Ульман Д. Построение и анализ вычислительных алгоритмов: Пер. с англ. М.: Мир, 1979.
8. Скворцов А.В. Реализация пакета транспортных задач в ГИС ГрафИн // Наст. журн.

Статья представлена кафедрой теоретических основ информатики факультета информатики Томского государственного университета, поступила в научную редакцию номера 3 декабря 2001 г.