

УДК 681.3.06:519.711

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

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

# ОБРАЗНАЯ МОДЕЛЬ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ОПЫТА ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ С ПОМОЩЬЮ ГЕОИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ

## Введение

Геоинформационные системы (ГИС) являются мощным инструментом информационной поддержки принятия решений. С одной стороны, ГИС хранят обширные систематизированные данные о реальном мире. Картографическая визуализация этих данных позволяет аналитикам решать трудноформализуемые задачи путем визуального анализа изображений. Выработка решений осуществляется в процессе манипулирования картографическим образом ситуации. Пользователь и ГИС в таком случае образуют систему гибридного интеллекта, способную порождать разумные и достоверные решения в условиях неполноты и противоречивости информации [1]. С другой стороны, ГИС обладают программными инструментами анализа пространственных данных. Известны самые разнообразные аналитические процедуры, которые используются в процессе принятия решений в среде ГИС [2]. Применяя аналитические инструменты, всегда следует иметь в виду то, что получаемый результат определяется качеством исходных данных, которыми обладает информационная система. По этой причине устойчивый интерес проявляется к исследованию таких механизмов поддержки принятия решений в ГИС, которые учитывают неполноту, неточность и неопределенность данных. Оснащенная подобными механизмами, ГИС приобретает свойства интеллектуальной системы. В данной работе рассматривается подход к интеллектуализации, основанный на использовании специальных информационных моделей представления опыта решения прикладных задач в картографическом виде.

## Интеллектуализация геоинформационных систем и прецедентный анализ

Интеллектуализация ГИС является одним из направлений развития геоинформационной технологии обработки данных. Конкретные пути достижения этой цели реализуются по-разному, в зависимости от уровня и сложности решаемых задач. Рассмотрим основные способы интеллектуализации применительно к процессу принятия решений.

Одним из способов является разработка агентно ориентированных технологий решения проблем [3]. Основой данного направления является представление модели реального мира в ГИС набором автономных взаимодействующих агентов. Главным для исследований в данной области является нахождение стратегий коллективного поведения агентов. Данный подход используется в настоящее время для моделирования процессов развития сложных систем. Решение частных задач сопряжено с определенными трудностями создания узкоспециализированных агентов.

Другим направлением интеллектуализации ГИС является создание геопространственной киберинфраструктуры [4]. Предметом исследований здесь является распределение информационных ресурсов о реальном мире, обеспечение их доступности, разработка децентрализованных процедур актуализации, создание протоколов обмена геопространственными данными на локальном и глобальном сетевом уровнях. Процесс принятия решений рассматривается в аспекте получения информационной поддержки со стороны глобальных геоинформационных сервисов. Интеллектуальность ГИС проявляется в «разумном» поисковом поведении, но не в нахождении решений конкретных прикладных задач.

По-прежнему актуально направление исследований по интеллектуальной визуализации пространственно-временных данных для принятия решений в планировании и управлении природными ресурсами [5]. Суть этих исследований в построении эффективных процедур визуального пространственного анализа объектов и отношений. Применительно к принятию решений остается малоисследованным вопрос о построении информативных рабочих областей визуального анализа, разумном отборе полезной информации.

Исследования в области интеллектуальных геоинформационных систем ведутся также в направлении агрегирования геоинформационных моделей и традиционных моделей представления знаний. В частности, с продукционной моделью [6]. Данный подход перспективен для оценки и прогнозирования

состояния окружающей среды посредством сложных технических комплексов. Проблемы накопления субъективных знаний о решении прикладных задач в рамках данного направления остаются малоисследованными.

Перспективным, с нашей точки зрения, представляется интеллектуализация ГИС, основанная на использовании опыта решения задач и механизма его прецедентного анализа [7]. Концепция сравнения реально наблюдавшихся прецедентов решения близких по сути задач естественным образом вписывается в концепцию картографического анализа с помощью ГИС. Всякий прецедент может быть представлен как пара объектов  $p = \langle s, d \rangle$ , в которой  $s$  является картой или схемой ситуации,  $d$  – картой или схемой решения. Прецедентный анализ предполагает, что близость пары прецедентов  $p_1$  и  $p_2$  оценивается принятой метрикой  $N(p_1, p_2)$ , отражающей «картину мира» интеллектуальной системы [8]. Если  $p_1$  описывает уже известную ситуацию, а  $p_2$  – анализируемую и расстояние между прецедентами не превышает заданного значения  $n$ , т.е.  $N(p_1, p_2) > n$ , то считается, что принятое решение для прецедента  $p_1$  может прямо или косвенно использоваться как решение для  $p_2$ . Прецедентный и картографический анализ объединяет то, что получению результата предшествует подготовительная работа по отбору необходимых информационных (картографических) ресурсов, их компоновке и согласованию. Кроме того, результатом анализа в обоих случаях является карта, схема или план.

Как показал анализ, картографическая модель ситуаций недостаточна для эффективного описания прецедентов. В работе [7] была введена концептуальная модель образа прецедента  $I_p = \langle I_s, I_d \rangle$ , имеющая две существенные особенности:

- образ прецедента включает в себя набор допустимых преобразований ситуации  $I_s$ , не меняющих суть этой ситуации и принятого в ней решения. Образ описывает не конкретную единичную ситуацию, а семейство ситуаций в заданных экспертом пространственных, временных и семантических границах. Преобразования конкретной ситуации всегда содержат обобщение. Тем самым в образ каждого прецедента закладывается фрагмент «картины мира», которая столь существенна для получения достоверного решения;
- образ прецедента несет в себе набор допустимых преобразований решения  $I_d$ , сохраняющих его сущность. Образ решения задает семейство решений, каждое из которых применимо в одинаковых по сути ситуациях. Такой подход дает возможность генерировать достоверное

«разумное» решение, поскольку является результатом дедуктивного логического вывода.

Обе особенности замечательны тем, что наиболее просто реализуются в графической среде ГИС. Представить любое из преобразований можно точечным, линейным или полигональным картографическим объектом, не прибегая к трудно воспринимаемым экспертами символьным преобразованиям. Визуализация преобразований играет решающую роль в достоверной передаче опыта эксперта интеллектуальной системе.

Прецедентный анализ в случае образного представления строится следующим образом:

- формируется образ  $I_{p^*}$  проблемной ситуации  $p^*$ . Он включает в себя все допустимые преобразования  $p^*$ ;
- среди множества образов  $I_{p_i}$  ( $i = \overline{1, K}$ ), описанных в ГИС, находится наиболее близкий по преобразованиям образ  $I_{p_j}$ , для которого  $N(I_{p^*}, I_{p_j}) > n$ ;
- из образа  $I_{p_j}$  выбираются решения, которые принимаются как разумные альтернативы в проблемной ситуации  $p^*$ .

Одной из проблем реализации приведенной схемы прецедентного анализа является согласование времени возникновения заданной и известной ранее ситуаций. Реальный мир непрерывно изменяется, поэтому метрика близости образов, строго говоря, должна зависеть от времени:

$$n = N(I_{p^*}, I_{p_j}, t_{p^*}, t_{p_j}).$$

Здесь  $t_{p^*}$  и  $t_{p_j}$  – соответственно, момент наблюдения проблемной ситуации  $p^*$  и наиболее близкого к ней прецедента  $p_j$ . Поскольку получить аналитическое выражение для указанной метрики достаточно сложно, в данной работе предлагается ввести процедуру актуализации известных образов прецедентов  $I_{p_j}$  перед их сравнением с  $I_{p^*}$ . Актуализация заключается в оценке применимости ранее полученного опыта в новой ситуации. Реализация подхода должна включать в себя формулировку правил оценки применимости опыта и процедуру актуализации образа.

#### Условия актуализации образа прецедента

Формально задача актуализации образа заключается в нахождении отображения

$$A: \langle I_s, I_d, t_p \rangle \rightarrow \langle I'_s, I'_d, t_{p^*} \rangle,$$

где  $t_{p^*} > t_p$ ,  $I'_s$  – допустимые преобразования ситуации  $I_s$  в момент времени  $t_{p^*}$ ,  $I'_d$  – допустимые в момент времени  $t_{p^*}$  преобразования решений  $I_d$ .

Общим случаем данной задачи является ее постановка в нечетком виде, поскольку на практике ни точное отображение, ни точное сравнение невозможны. Поэтому введем следующие ограничения:

$$\mu(A) > \mu_{A*}$$

$$\mu(t_{p*} > t_p) > \mu_{t*}$$

где  $\mu_{A*}$  – допустимый уровень достоверности актуализированного образа,  $\mu_{t*}$  – допустимый уровень истинности утверждения об «устаревании опыта» и необходимости актуализации. Приведенные ограничения отражают условия «разумного» решения задачи актуализации:

- процедура актуализации не должна выполняться при существенном, с точки зрения пользователя, устаревании опыта, независимо от его содержания;
- процедура актуализации должна оценить содержательность опыта: могут ли быть получены из образа полезные альтернативы на указанный момент времени.

Сформулируем условия непротиворечивости и полезности образного представления опыта. Содержательно актуализация заключается в проведении картографического анализа и выявлении того, что появившиеся к моменту времени  $t_{p*}$  на карте объекты существенным образом изменяют ранее сложившееся представление о преобразованиях ситуации  $I_s$ . Таким образом, зоне преобразований ситуации  $I_s$  сопоставляется уровень принадлежности  $\mu(I_s)$  преобразованиям ситуации  $I_s$ . Если степень уверенности ниже принятого уровня  $\mu^*I_s$ , опыт невозможно согласовать ни с одной проблемной ситуацией.

Условием непротиворечивости, таким образом, является:

$$\mu(I_s) > \mu^*I_s.$$

Условие полезности актуализированного образа имеет вид:

$$\mu(I_d) > \mu^*I_d.$$

Здесь  $\mu(I_d)$  является степенью принадлежности преобразований решений  $I_d$  преобразованиям решений  $I_d$ . Данное условие определяет, что применение ранее известных решений возможно только в случае, если уровень уверенности выше  $\mu^*I_d$ .

### Процедура актуализации образа

Исходным для процедуры актуализации образов является рабочая область общей карты ГИС, построенная для анализа проблемной ситуации и поиска альтернативных решений. Построение рабочей области является стандартной процедурой картографического анализа [9], предполагающей отбор существенно важной информации и ее согласование. Особенностью современных ГИС является возможность использовать для формирования картографических изображений различные источники информации сети Интернет. К ним относятся снимки земной поверхности, инфографика событий, картографические материалы специализированных

сообществ социальных сетей, новостные потоки, а также другие источники некартографических материалов. По объективным причинам автоматическое картографирование объектов и явлений на основании перечисленных данных невозможно. Однако значимость отдельных фактов может компенсировать возможные дефекты их картографического отображения. Например, риск потерь из-за затопления участка транспортной магистрали может быть настолько велик, что даже приближенно обрисованные границы позволят принять более обоснованное решение.

Будем считать, что интеллектуальная ГИС обладает подсистемой поиска информации во внешней сетевой среде и выполняет картографирование не полностью определенных ситуаций [10]. Возникающие дефекты отображения оцениваются и исключаются из рабочей области картографического анализа для обеспечения ее максимальной полезности в целом. Тогда процедура актуализации заключается в анализе картографического изображения для оценки применимости преобразований, заданных образом прецедента.

Чтобы оценивать применимость преобразований, необходимо реализовать в базе знаний ГИС нечеткое отношение  $R_s(C_s, C_F, R_T)$ , связывающее экземпляры классов преобразований ситуаций ( $C_s$ ), классов картографических объектов ( $C_F$ ) и классов топологических отношений между ними ( $R_T$ ). Уровень нечеткости каждого кортежа отношения отражает применимость преобразования. Например, преобразование «область парковки» может оказаться «рядом с» объектом «зона строительства» и «пересекать» объект «зона стоянки технологического транспорта». Предположим, что степень принадлежности такого кортежа  $\mu_{R_s} = 0,1$ . Следовательно, применимость преобразования «область парковки» в данном случае оценивается достаточно низко и, как следствие, использование соответствующего ему образа мало достоверно.

Трудностью практической реализации отношения  $R_s(C_s, C_F, R_T)$  является его громоздкость по числу кортежей. Общее число кортежей можно подсчитать как

$$|R_s C| = |C_s| \times |C_F| \times |R_T|.$$

Как показал анализ, это значение существенным образом определяет разнообразие топологических отношений  $R_T$  между экземплярами объектов на карте. Число топологических отношений быстро растет по мере наполнения карты объектами. Для снижения размерности можно предложить использовать покрытие множества  $R_T$  набором классов топологических отношений  $\tilde{R}_T$ , состоящего из меньшего числа элементов, т.е.  $|\tilde{R}_T| \ll |R_T|$ .

Каждый класс из  $\hat{R}_T$  обобщает комбинации топологических отношений в категорию более высокого смыслового уровня. Например, класс «топологические отношения, мешающие парковке» может включать любые ситуации, когда объекты классов зданий, сооружений, строящихся объектов и ряда других располагаются на границе или внутри области преобразования «зона парковки». Выявить подобные ситуации можно с помощью программных инструментов топологического анализа ГИС [11].

Набор классов  $\hat{R}_T$  и соответствующие правила классификации относятся к глобальной «картине мира» интеллектуальной ГИС. Представления экспертов о преобразованиях ситуаций не зависят от содержания и пространственно-временного положения самих ситуаций.

Процедура оценки полезности актуализированного образа включает в себя следующие этапы:

- 1) построение зоны преобразований образа  $I_s$ ;
- 2) обор картографических объектов, отражающих ситуацию на заданный момент времени  $t_{p*}$ ;
- 3) классификацию топологических отношений между зоной преобразований и отобранными картографическими объектами;
- 4) определение степени применимости образа  $\mu(I_s)$  с помощью нечеткого отношения  $R_s(C_{I_s}, C_F, \hat{R}_T)$  базы данных ГИС.

Особенностью оценки полезности образа является то, что принятые решения описываются, возможно, специальными картографическими объектами и отношениями. Например, в задачах логистики любое решение является процессом перемещения материального потока и выполнения над ним логистических операций по заданному расписанию. Процесс может быть показан на карте набором линий, соответствующих перемещению, и набором точечных объектов, обозначающих операции. Полезность любого решения в таком случае можно оценить, рассматривая его элементы – картографические объекты. Например, операция «перевести автотранспортным средством» из точки А в точку В реализуема только тогда, когда на участок автомагистрали между А и В не наложены такие события, как «природная катастрофа», «ремонт», «дорожно-транспортное происшествие». В этом специфика оценки реализуемости преобразований решений.

Соответственно специфике описания решений должны учитываться топологические отношения. Таким образом, следует сделать вывод, что введенное выше нечеткое отношение  $R_s(C_{I_s}, C_F, R_T)$  не может быть использовано повторно для оценки полезности образа. Требуется создать нечеткое отношение  $R_d(C_{I_d}, C_F, \hat{R}_T)$ , связывающее экземпляры классов

объектов решения  $C_{I_d}$  с экземплярами картографических объектов  $C_F$  и экземплярами специальных топологических отношений решения  $\hat{R}_T$ .

Процедура оценки полезности включает в себя, соответственно, следующие шаги:

- построение карты преобразований решения, т.е. отображение известных возможных вариантов решений  $I_d$ ;
- нанесение на карту объектов реальной ситуации на момент времени  $t_{p*}$ ;
- определение для каждого решения из  $I_d$  топологических отношений  $\hat{R}_T$  и построение нечеткого заключения о реализуемости решения;
- оценка полезности преобразований решений  $I_d$  при заданном уровне реализуемости  $\mu^* I_d$ .

### Пример использования образного представления ситуаций

Рассмотрим пример принятия решения о выборе места парковки автомобиля. Пусть требуется найти место бесплатной парковки вблизи железнодорожного вокзала.

Считается, что эксперт имеет опыт, полученный в результате удачной парковки (рис. 1). Эксперт способен проанализировать и обобщить этот прецедент, представив результат анализа набором преобразований. На схеме показано, что, находясь в точке А, водитель проехал через точки возможной парковки В и В, которые оказались занятыми. Удачей завершился поиск и парковка в точке Д. На основании этого опыта эксперт строит образ прецедента «парковка в районе железнодорожного вокзала». На рис. 2 показаны картографические компоненты образа ситуации, состоящие из двух областей.

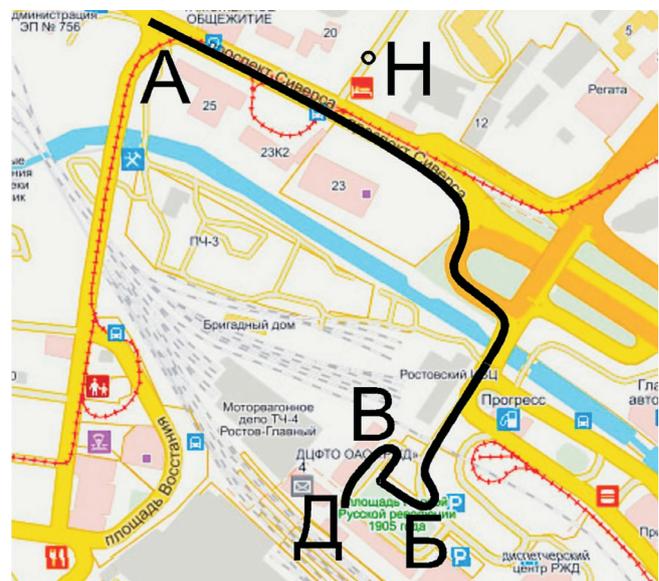


Рис. 1. Схема прецедента парковки



Рис. 2. Допустимые преобразования ситуации образа прецедента

Область  $I_1$  отображает возможные преобразования начального положения автомобиля, водитель которого ищет парковку. Область  $I_2$  отображает возможные преобразования положения конечной цели парковки. Суть задачи не меняется, если требуется припарковаться для посещения любого учреждения в указанной области.

На рис. 3 показаны допустимые преобразования решения – те возможные траектории, по которым следует перемещаться при поиске свободного места. В примере таких решений два:  $D_1$  и  $D_2$ . Оба решения сконструированы экспертом и являются по сути совершенно равноценными. Заметим, что в определенных точках водителем должен выполняться визуальный обзор участка местности. Эти операции обозначены кольцами. Каждая такая операция является частью решения.

Можно видеть, что образное представление шире первичного описания прецедента, на основании которого невозможно было бы достоверно анализировать задачи парковки с целью посещения близлежащих зданий. Естественным образом исключаются правдоподобные, но недостоверные решения. Например, на основании образа не может быть сделан малодостоверный вывод о том, что принятое ранее решение можно применить, находясь в точке  $H$  (рис. 1).

На рис. 4 показана рабочая область с оперативно картографированными объектами на момент принятия решения. Зона, обозначенная буквой  $K$ ,

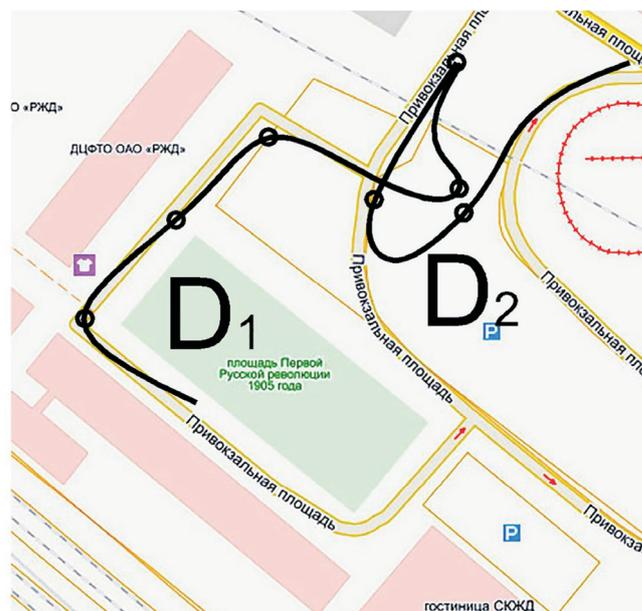


Рис. 3. Допустимые преобразования решения образа прецедента

получена, например, анализом изображений с веб-камер и показывает область максимальной плотности припаркованных автомобилей. Как видно из схемы, решение  $D_1$  из-за этого нереализуемо, однако имеется вариант  $D_2$  который оставляет образ полезным для принятия решений.

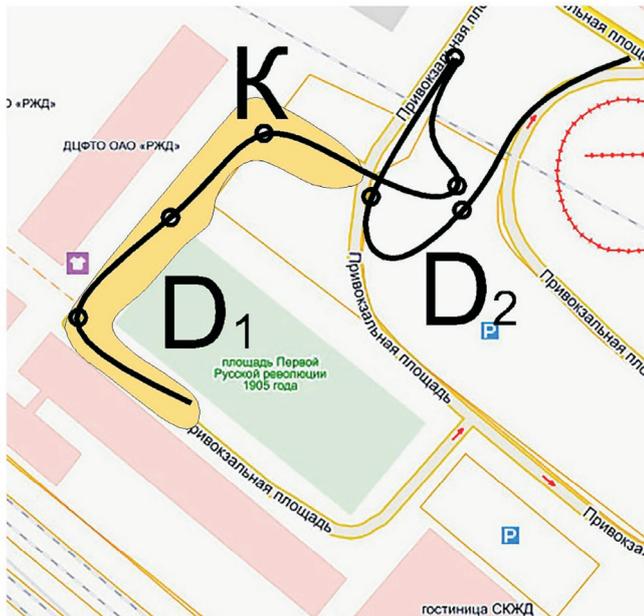


Рис. 4. Рабочая область на момент принятия решения

### Заключение

Основным результатом применения образной модели в ГИС является повышение достоверности принятия решений в сложных ситуациях при недостатке информации. Это основано на следующем.

Во-первых, близость произвольно заданных ситуаций оценивается не расстоянием между ними в признаковом пространстве, а пересечением областей допустимых преобразований. Область включает в себя множество эквивалентных по смыслу ситуаций. Следовательно, снижается ошибка принятия решения, обусловленная использованием единичных фактов.

Во-вторых, логика принятия решений в рассматриваемом случае базируется на дедуктивном рассуждении, которое, как известно [12], является правдоподобным и достоверным. Любое решение, полученное из образа, всегда является частным случаем возможного преобразования решений.

Наконец, механизм поиска и анализа событий и объектов, характеризующих реальный мир в момент принятия решений, обеспечивает более высокий уровень соответствия результата реальной действительности.

Работа выполнена при финансовой поддержке грантов РФФИ 13-07-13103 офи\_м\_РЖД и 12-01-00032.

**Ключевые слова:** геоинформационные системы, прецедентный анализ, образное представление опыта, актуализация данных.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Bédard Y., Han J. Fundamentals of spatial data warehousing for geographic knowledge discovery // Geographic data mining and knowledge discovery, 2nd. – Taylor & Francis, 2009.
2. Черемисина Е.Н., Спивак Л.Ф., Спивак И.Л. Информационно-аналитическое обеспечение ситуационного центра управления территориями // Геоинформатика. – 2013. – № 3. – С. 1-7.
3. Batty M.A. Generic Framework for Computational Spatial Modelling // Agent-Based Models of Geographical Systems. – Springer Science+Business Media BV, 2012.
4. Li W., Linna L., Goodchild M.F., Anselin L.A. Geospatial cyberinfrastructure for urban economic analysis and spatial decision-making // ISPRS International Journal of Geo-Information. – 2012. – N. 2. – P. 413-431.
5. Pettit C., Cartwright W., Bishop I., Lowell K., Puller D., Duncan D., Landscape Analysis and Visualisation, Spatial Models for Natural Resource Management and Planning. – Berlin : Springer-Verlag, 2008.
6. Интеллектуальные географические информационные системы для мониторинга морской обстановки / под. общ. ред. чл. кор. РАН Р.М. Юсупова и д-ра техн. наук В.В. Поповича – СПб. : Наука, 2013. – 284 с.
7. Беляков С.Л., Белякова М.Л., Савельева М.Н. Прецедентный анализ образов в интеллектуальных геоинформационных системах // Информационные технологии. – 2013. – № 7. – С. 22-25.
8. Варшавский П.Р., Еремеев А.П. Моделирование рассуждений на основе прецедентов в интеллектуальных системах поддержки принятия решений // Искусственный интеллект и принятие решений. – 2009. – № 1. – С. 45-57.
9. Берлянт А.М. Картографический метод исследования. – М. : Изд-во МГУ, 1988.
10. 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. – P. 326-333.
11. ArcGIS Server 9.3 – Topology in ArcGIS. – URL: [http://webhelp.esri.com/arcgisserver/9.3/java/index.htm#geodatabases/topology\\_in\\_arcgis.htm](http://webhelp.esri.com/arcgisserver/9.3/java/index.htm#geodatabases/topology_in_arcgis.htm) (дата обращения: 10.04.2014).
12. Вагин В.Н., Головина Е.Ю., Загорянская А.А., Фомина М.В. Достоверный и правдоподобный вывод в интеллектуальных системах / под ред. В.Н. Вагина и Д.А. Поспелова. – 2-е изд., испр. и доп. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2008. – С. 704.