

С.Л. Беляков, М.Л. Белякова, С.А. Зубков, Н.А. Голова, К.С. Яворчук

ТРАНСФОРМИРОВАНИЕ ОПЫТА ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ В ПРОСТРАНСТВЕННЫХ СИТУАЦИЯХ*

Рассматривается задача переноса опыта принятия решений в ситуационном анализе, использующим геоинформационные системы. Необходимость интеллектуальной поддержки со стороны геоинформационной системы обусловлена тем, что пространственные объекты и связи реального мира чрезвычайно динамичны. Применять в этих условиях аналитические модели процессов и явлений не удастся из-за неполноты и противоречивости описывающей их информации. Статистические модели зависят от большого числа факторов, которое варьируется при изменении географического положения ситуации. Альтернативой может стать использование опыта экспертов, способных принимать эффективные решения в локальных пространственных ситуациях. Неконтролируемость повторного использования опыта является проблемой. Знания, полученные при выработке решений в одной местности, могут привести к неадекватным решениям в другой местности. Опыт решения проблемы в одной и той же местности теряет свою значимость с течением времени. В работе предлагается представление знаний в виде образа, состоящего из центра и допустимых преобразований центра. Вводятся функции трансформирования образов, выполняющие перенос знаний. Анализируются свойства функций трансформирования, которые несут в себе процедурное знание об образах ситуаций. Рассматривается использование выявленных свойств для формирования плана тестирования программных процедур трансформирования. Изучаются критерии успешного трансформирования. Формулируется оптимизационная задача поиска наилучшей функции трансформирования в базе знаний ГИС. Предлагается обобщенная методика трансформирования опыта. Приводится пример синтеза методов трансформирования для выбора центра оперативного обслуживания вызовов. Образ ситуации принятия решения о выборе земельного участка для центра обслуживания, трансформируется в заданную область на карте ГИС.

Интеллектуальные геоинформационные системы; ситуационный анализ; перенос знаний; принятие решений.

S.L. Belyakov, M.L. Belyakova, S.A. Zubkov, N.A. Golova, K.S. Yavorchuk

TRANSFORMING THE DECISION-MAKING EXPERIENCE IN SPATIAL SITUATIONS*

The problem of transferring the experience of decision-making in situational analysis using geoinformation systems is considered. The need for intellectual support from the geoinformation system is due to the fact that spatial objects and connections of the real world are extremely dynamic. Under these conditions, it is not possible to apply analytical models of processes and phenomena due to the incompleteness and inconsistency of the information describing them. Statistical models depend on a large number of factors, which vary as the geographical location of the situation changes. An alternative is to use the experience of experts who are able to make effective decisions in local spatial situations. The lack of control over the reuse of experience is a problem. The knowledge gained in developing solutions in one locality can lead to inadequate solutions in another locality. The experience of solving a problem in the same area loses its significance over time. In this paper, we propose a representation of knowledge in the form of an image consisting of a center and acceptable transformations of the center. Image transformation functions that perform knowledge transfer are introduced. The properties of transformation functions that carry procedural knowledge about the images of situations are analyzed. The use of the identified properties for the formation of a test plan for software transformation procedures is considered. The

* Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-07-00074.

criteria for successful transformation are studied. The optimization problem of finding the best transformation function in the GIS knowledge base is formulated. A generalized method of transforming experience is proposed. An example of the synthesis of transformation methods for selecting an operational call center is given. The image of the situation of making a decision about choosing a land plot for a service center is transformed into the specified area on the GIS map.

Intelligent geographic information systems; situational analysis; knowledge transfer; decision-making.

Введение. Использование интеллектуальных систем для принятия решений основано на повторном применении знаний, полученных в результате наблюдения и анализа объектов, событий и явлений в определенной области реального мира. Возможность повторного применения и возникающий при этом эффект не гарантируются, так как свойства и поведение мира непрерывно меняются. Для пространственных ситуаций данная особенность играет существенно важную роль. Опыт разрешения проблемной ситуации, полученный в некоторой местности, с течением времени может оказаться совершенно бесполезным из-за необратимых изменений природной и техногенной среды. Попытка применить знания к ситуации в другой местности сразу ставит вопрос о том, насколько корректно такое действие и каковы его последствия. Таким образом, конкретного знания, ограниченного тесными пространственно-временными рамками, оказывается недостаточно и требуется привлечение знания обобщенного. Но известна проблема использования обобщений, полученных для больших пространственно-временных областей: эти обобщения оказываются малодостоверны в областях локальных. Поэтому задача рационального сочетания обобщения и конкретизации в знаниях, применяемых для принятия решений в пространственном ситуационном анализе, остается актуальной.

В данной работе рассматривается выработка решений в пространственных ситуациях, описываемых объектами и отношениями реального мира с помощью геоинформационных систем (ГИС). Картографическое отображение в сочетании с инструментами пространственного анализа широко используется в различных областях производства, бизнеса и транспорта. Это создает благоприятные условия для накопления и совместного использования знаний профессиональными сообществами. Целью настоящей работы является анализ формы представления знаний, обеспечивающей контролируемый перенос опыта на проблемные пространственные ситуации.

Трансформирование знаний в ситуационном анализе. В общем случае ситуационный анализ предполагает выявление элементов и связей, характеризующих суть ситуации либо с целью выработки действий, которые переведут ее в требуемое состояние, либо для прогнозирования будущих состояний. Сложность решения таких задач с использованием ГИС [1] связана с неопределенностью и неполнотой аналитических моделей реальных объектов и процессов [2], огромным количеством конкретных пространственных данных, которые невозможно достоверно обобщить [3], трудностями обнаружения и формализации знаний экспертов, которые успешно решают задачи рассматриваемого типа [4]. Данную проблему можно решать, отображая известные образы ситуаций в заданную пространственную область [5]. Суть отображения в том, что ситуация в указанной области пространства реконструируется с использованием картографических данных ГИС. Карта несет в себе обширную информацию о структуре и топологии области анализа. Знание о наблюдавшихся ранее ситуациях при определенных условиях позволяют оценить реализуемость события или явления и затем рационально оценить принимавшиеся в данной ситуации решения. Факт реализуемости гипотетической ситуации представляется чрезвычайно важным. Эксперты-аналитики всегда интуитивно выполняют это действие, приступая к изучению проблемной си-

туации. Об этом говорят исследования когнитивной психологии [6]. Мысленное сопоставление известных прецедентов с проблемной ситуацией выполняется для оценки их смысловой близости. Например, неразумно сопоставлять ситуацию борьбы с пожаром в тайге и лесопарке, который расположен вблизи мегаполиса. Существует опасность того, что формально вычисляемая близость не учтет некоторых деталей и приведет к бессмысленному решению. Опасность усиливается тем, что пространственные ситуации отличаются наличием большого числа разнородных параметров, влияние которых существенно зависит от географического положения. Это заставляет пользоваться необоснованной аналогией, которая правдоподобна, но не достоверна [7].

Рассмотрим представление ситуации образом как кортеж

$$I = \langle s, H(s) \rangle, \quad (1)$$

первый элемент которого (s) является центром образа I , второй ($H(s)$) – набором допустимых преобразований центра, сохраняющих смысл образа. Центром считается реально наблюдавшаяся ситуация, допустимое преобразование – вариант прецедента, не меняющий сути ситуации в целом. Допустимые преобразования описываются экспертом. Выражение (1) формализует понятие смысла, что необходимо для обоснования операции трансформирования. Исследуемая модель образного представления ситуаций включает кроме прецедента (s) его интуитивные экспертные обобщения ($H(s)$), благодаря которым становятся возможными дедуктивные заключения вида

- (i) если два любых образа имеют одинаковые допустимые преобразования, то они близки по смыслу;
- (ii) два образа А и В имеют одинаковые допустимые преобразования;
- (iii) следовательно, А и В близки по смыслу.

Совпадение отдельных допустимых преобразований двух различных ситуаций есть факт, который ведет к правдоподобному и достоверному выводу. Однако, трудность использования указанного правила вывода заключается в необходимости расположения допустимых преобразований в одной пространственной области, играющей роль базы дедукции. Это приводит к необходимости трансформирования образов.

Обобщенно операция трансформирования должна выполняться применением функции трансформирования

$$I_{new} = F_{TR}(I_{src}, w) = \langle s_{new}, H(s_{new}) \rangle,$$

где I_{src} – исходный образ, W – целевая область карты для трансформирования. Построение функции трансформирования представляет собой сложную проблему с большим числом вариантов трудно проверяемых с точки зрения достоверности решений, поэтому следует декомпозировать задачу для формулировки частных подзадач, решение которых можно проверить. Анализ показал следующее.

Функция трансформирования F_{TR} является векторной, размерность которой составляет $(M+2)$ и определяется числом допустимых преобразований конкретного образа:

$$F_{TR} = (f_{TR_s}, f_{TR_{h_0}}, f_{TR_{h_1}}, \dots, f_{TR_{h_M}}),$$

где f_{TR_s} – функция трансформирования центра образа, $f_{TR_{h_i}}$ – его i -го допустимого преобразования. Компоненты вектора независимы и должны определяться соответственно типу отражающего преобразование картографического объекта. Например, уличная парковка всегда ориентирована вдоль линии дороги, тогда как

внутриквартальная ограничена находящимися рядом зданиями, сооружениями и дорогами. Таким образом, парковки двух типов должны отображаться в заданную местность по-разному, а функции трансформирования должны соответствовать типам допустимых преобразований.

Следуя принципам объектного подхода, можно утверждать, что каждый экземпляр образа должен включать программно реализованный метод трансформирования. Для того, чтобы применить f_{TR_s} в области W , всякий прецедент должен быть параметризован, т.е. выделены сущности, пространственное размещение которых определяет смысл прецедента. Например, логистическая цепь поставки задается расположением производителя продукта, потребителя и списком логистических операций; площадь разлива нефтепродуктов – точкой расположения источника утечки, объемом нефтепродукта, его средней плотностью. Параметризация позволяет избежать изучения огромного числа вариантов «вписывания» прецедента в область W .

Критерием достоверности трансформирования следует считать получение нетривиальных (обладающих центром) образов, которые сохраняют заданный инвариант преобразования: либо площадь отображения на карте, либо размерности допустимых преобразований, либо распределения типов допустимых преобразований, и т.д. Различные инварианты порождают различные результаты трансформирования. Подбор инварианта, адекватного сути ситуационного анализа, может основываться на имеющихся описаниях образов, т.е. данная поисковая задача автоматизируется.

Анализ известных подходов к трансформированию образов. Трансформирование образов можно рассматривать как реализацию обучения и построения рассуждений, основанных на применении аналогии [8]. Аналогия, не являясь достоверным способом рассуждения, используется при прогнозировании в условиях неопределенности. Основная решаемая проблема в этом случае – определение базы аналогии, т.е. набора фактов и логических правил, которые предполагается использовать для формирования утверждений по аналогии. Достоверность результата может быть проверена лишь на наборе данных о реальных событиях или явлениях. Возникает, таким образом, итерационный процесс подбора базы аналогии, приводящий к удовлетворительным выводам на наборе экспериментальных данных. Эта процедура носит чрезвычайно обобщенный характер и требует конкретизации отдельных подзадач. Например, формы представления знаний об элементах базы аналогии.

Близким по сути к трансформированию ситуаций можно считать процедуры принятия решений, основанные на абдукции [7]. Абдукция рассматривается как важный компонент научного познания [9]. Получение заключений от частного к частному дает возможность интеллектуальной системе генерировать гипотезы, тем самым моделируя человеческое воображение, необходимое для прогнозирования. Реализация данной идеи применительно к образам ситуаций требует исследования.

Прецедентный анализ (Case Based Reasoning, CBR) можно рассматривать как исследованную реализацию метода принятия решений по аналогии [10]. Картографический и ситуационный анализ используют CBR и существует много работ, исследующих представление знаний, метрики близости прецедентов и визуальное представление результатов логического вывода. Нерешенной проблемой остается сохранение смысловых рамок сравнения прецедентов. Эффективность результата CBR связана как с близостью задач, так и с близостью данных, используемых для их решения. Предполагается, что все особенности задач и данных учтены метрикой, однако универсального способа построения такой метрики на сегодняшний день не существует. Кроме того, в CBR не учитывается реализуемость прецедентов: считается, что пространство прецедентов однородно и сравнение близости

любой пары прецедентов корректно. Однако, это не так в случае пространственных ситуаций. Поэтому продолжение исследований CBR должны идти в направлении поиска способов сохранения смысловых рамок анализа прецедентов.

В исследованиях по машинному обучению фигурирует задача передачи знаний (transfer learning). Как показал анализ, исследуемые проблемы группируются следующим образом:

1) оценка изменений пространства признаков обучения исходной модели X_S и пространства признаков целевой области принятия решений X_T . Идея решения заключатся во введении весовых коэффициентов для признаков исходной и целевой области анализа [11, 12] при обучении модели для целевой области. Вес коэффициентов подбирается экспериментально. Другим вариантом является выявление наиболее значимых признаков, включаемых обеими областями [13, 14]. Для этого используются знания о признаках и их значимости. Такой подход ограничен тем, что проблемная и целевая области могут не иметь общих признаков;

2) учет различия распределений признаков в исходной и целевой области ($P(X_S) \neq P(X_T)$). По сути, данное соотношение отражает неоднородность пространства признаков. Для решения этой проблемы применяют методы извлечения знаний из данных [12, 15];

3) оценка влияния изменения оценок $Y_S \neq Y_T$ на наборах признаков в исходной и целевой областях. Данная особенность отражает разницу в толковании ситуаций из разных областей наблюдения. В этом случае также организуют поиск знаний о критериях оценки прецедентов [16];

4) оценка различия условных распределений $P(Y_S / X_S) \neq P(Y_T / X_T)$, отражающих смысловое различие из-за несовпадения причинно-следственных связей между ситуациями разных областей. Как и в предыдущем случае, используются выявленные при анализе данных знания [17]. Соответственно, проблемы представления и использования этих знаний остаются до конца не решенными.

Для переноса знаний используется также визуализация, исследуемая в ряде работ [9, 18]. Визуальные представления необходимы для совместной работы эксперта и интеллектуальной системы над выработкой решений. Следует отметить, что рассматриваемые исследования направлены на поиск удобных форм и способов визуализации. С этой точки зрения ГИС имеют преимущества как универсальный инструмент визуализации пространственных объектов. Тем не менее, обращает на себя внимание задача подбора адекватных показателей, позволяющих доверять визуализации объектов предметной области. Чаще всего здесь предлагаются узкоспециализированные решения.

Исследование задач прогнозирования, реализуемых ГИС, концентрируются на разработке адекватных задаче структур данных. Например, в работе [19] исследована модель оценки относительного перемещения объектов и динамики изменения заданных отношений. Введены соответствующие структуры данных, классы запросов и операторов. Это позволило реализовать сценарный анализ множеств движущихся объектов. Подобные исследования показывают полезность введения концепции специальных пространств представления анализируемых сущностей.

Типичным подходом к разработке новых методов прогнозирования является комбинирование моделей машинного обучения и биоинспирированных алгоритмов. Например, в работе [20] комбинируется классификатор с роевым алгоритмом. Это позволило создать эффективную модель прогнозирования наводнений. Трудностью использования комбинирования является необходимость экспериментальной проверки любого сочетания поискового алгоритма и области данных.

В работе [21] исследована модель «осмысленности» (meaningfulness) операций статистического прогнозирования и обобщения, используемых в ГИС. Задача сведена к построению функций оценки «осмысленности», которые зависят от типов факторов, представляющих измерения. На основе такого подхода авторами предлагается онтология статистического анализа в ГИС. Недостатком такой постановки задачи является отсутствием конструктивного способа получения образа ситуации в заданной местности.

Метод трансформирования в классе допустимого преобразования. Функция трансформирования реализует отображение ситуации X класса T_j в ситуацию y класса T_j в заданной пространственной области W

$$y = f_{TR}^{(T_j)}(x, w)$$

являясь методом этого класса допустимого преобразования. Укажем свойства, которыми должна обладать функция трансформирования:

$$1) \quad x = f_{TR}^{(T_j)}(x, A(\langle s, H(s) \rangle)), x \in \langle s, H(s) \rangle, \quad (2)$$

где $A(z)$ – функция определения границ области на карте, которую занимает множество картографических объектов Z . Свойство говорит о том, что трансформирование экземпляра допустимого преобразования в область самого образа рефлексивно;

$$2) \quad x \subseteq y \Rightarrow f_{TR}^{(T_j)}(x, w) \subseteq f_{TR}^{(T_j)}(y, w), \quad (3)$$

что является дискретным аналогом монотонности функции;

$$3) \quad f_{TR}^{(T_j)}(x \cup y, w) = f_{TR}^{(T_j)}(x, w) \cup f_{TR}^{(T_j)}(y, w). \quad (4)$$

Данное свойство реализует смысловую независимость наборов однотипных допустимых преобразований: трансформирование для каждого элемента не должно влиять на любой другой элемент, при этом результаты допустимо объединять;

$$4) \quad f_{TR}^{(T_j)}(x \cap y, w) = f_{TR}^{(T_j)}(x, w) \cap f_{TR}^{(T_j)}(y, w). \quad (5)$$

Данное свойство отражает смысловую общность набора однотипных преобразований.

Перечисленные свойства порождают требования к программной реализации трансформирования. Программная процедура должна тестироваться на тестовых случаях, разработанных для оценки соответствия свойствам.

При поиске конкретной реализации функции трансформирования возникает необходимость оценки качества найденного решения. Качество определяется достоверностью результата, полученного применением функции к картографическим объектам допустимого преобразования в определенной области карты. Здесь могут быть предложены различные варианты критериев, например:

– объект-оригинал X и его трансформация $f_{TR}^{(T_j)}(x, w)$ близки по площади, занимаемой на карте

$$|A(x) - A(f_{TR}^{(T_j)}(x, w))| > \delta_S,$$

где δ_S – порог близости. Данный критерий естественен для полигональных объектов карты. Например, если изучается явление разлива жидкости, то площадь разлива является основным параметром оценки явления;

– объект-оригинал X и его трансформация близки по протяженности:

$$|L(x) - L(f_{TR}^{(T_j)}(x, w))| > \delta_L,$$

где $|L(x)$ – функция оценки протяженности объекта, δ_L – порог близости по протяженности. Например, если исследуется транспортная сеть, то протяженность маршрутов достоверно оценивается данным критерием;

– объект-оригинал X и его трансформация близки по мощности множеств составляющих их точечных объектов:

$$\|x - |f_{TR}^{(T_j)}(x, w)\| > \delta_N,$$

где δ_N – порог близости. Например, при ситуационном анализе вызовов городских оперативных служб важная количественная оценка – число вызовов на заданной территории;

– объект-оригинал X и его трансформация $f_{TR}^{(T_j)}(x, w)$ имеют близкое распределение заданного показателя $M(z)$:

$$\|P(M(x)) - P(M(f_{TR}^{(T_j)}(x, w)))\| > \delta_P,$$

где δ_P – порог близости распределений показателя, $\|\bullet\|$ – метрика близости распределений, например, Кульбака-Лейблера [22].

Наличие критерия оценки качества функции трансформирования позволяет сформулировать оптимизационную задачу ее поиска. Если в базе знаний ГИС имеется множество образов $I_B = \{I_1, I_2, \dots, I_a\}$, описано множество классов допустимых преобразований $T_B = \{T_1, T_2, \dots, T_b\}$ и множество функций трансформирования для каждого класса $f_{TR_k}^{(T_j)}(x, w), k = 1, 2, \dots, K_{T_j}$, то функция $f_{TR}^{I_m}(x, w)$, наилучшим образом трансформирующая объект X в область W для заданного образа $I_m \in I_B$, минимизирует функционал

$$\sum_{T_B} \sum_k \|f_{TR}^{I_m}(x, w) - f_{TR_k}^{T_j}(x, w)\| \rightarrow \min. \quad (6)$$

Анализ (6) позволил сделать следующие выводы:

1) применение конкретной функции трансформирования при использовании некоторого образа $I_m \in I_B$ определяется опытом применения трансформирования в конкретные области карты. Эта особенность выражением (6) не учитывается;

2) накопление знаний о функциях трансформирования ГИС является независимым процессом пополнения базы знаний. Новая функция вводится как процедурное знание, расширяющее функциональность ГИС. область применимости явно не задается;

3) процесс получения знаний об образах является дорогостоящей работой, которую проделывают эксперты. Поэтому следует ожидать, что их число не будет велико настолько, чтобы считать его статистически достаточным. Необходима процедура синтеза знаний о функциях трансформирования, учитывающая трудоемкость извлечения знаний;

4) вычислительная сложность процедуры поиска оценивается как $O(|T_B|)$, что в ряде приложений может вызвать проблемы. Перебор всех зарегистрированных в ГИС функций потенциально может быть сокращен добавлением пространственного индекса.

Все перечисленное приводит к идее зонирования территории, применяемой в географии и картографии [21–23]. В данном случае каждой зоне на карте сопоставляется функция трансформирования. Зоны могут перекрываться.

Имея тематическую карту зонирования функций трансформирования, поиск экземпляра функции трансформирования можно свести к определению покрытия области анализа

$$w_A = \bigcup_q Z_q,$$

где Z_q – зона функции трансформирования. Если $w_A = \emptyset$, это означает, что ГИС не обладает необходимыми знаниями для трансформирования. Если $q > 1$, то трансформирование может быть выполнено несколькими способами.

Реализация алгоритмов трансформирования. Ввиду того, что функции трансформирования определены на множестве картографических объектов, рассмотрим методику их синтеза как разработку алгоритма трансформирования. Свойства (2)–(5) определяют наиболее общие требования к программе реализации трансформирования. Соответственно этим требованиям должен тестироваться конечный продукт. Однако, этих требований недостаточно по причине значительного разнообразия классов трансформируемых объектов. Трансформирование не может быть универсальным. Но некоторые этапы могут быть унифицированы. Рассмотрим реализацию метода трансформирования на примере задачи принятия решения о размещении центра оперативного обслуживания вызовов (ЦООВ). Задача состоит в том, чтобы в заданной области выбрать земельный участок, на котором должны быть размещены персонал, транспортные средства и вспомогательное оборудование для выезда группы реагирования в точку экстренного вызова. Выезд завершается либо возвращением группы в ЦООВ сразу, либо после перевозки пострадавших людей (или некоторых объектов) в сервисные центры (например, в клинические больницы) за пределами обслуживаемой территории. Сложность формального решения данной задачи в неоднозначности возможной постановки и критериев оценки решения. Более практичным подходом является сценарное планирование, предполагающее анализ возможных вариантов размещения ЦООВ. Варианты связываются с принимавшимися ранее решениями в близких по смыслу ситуациях.

Ранее реализованное решение о размещении ЦООВ послужило основой создания образа, описанного картами на рис. 1. На рис. 1,а показано положение земельного участка с ЦООВ. Штриховкой показаны участки, использование которых допустимо. На рис. 1,б изображен фрагмент схемы дорожной сети из автомагистралей и внутриквартальных проездов. Любой допустимый участок размещения ЦООВ должен прилегать к автомагистрали. На рис. 1,с показано пространственное распределение среднего числа вызовов за сутки, на рис. 1,д – распределение плотности населения, на рис. 1,е приведено расположение внешних сервисных центров, на рис. 1,ф – уровень сезонной доступности территории для автотранспорта (более плотная штриховка означает худшую доступность).

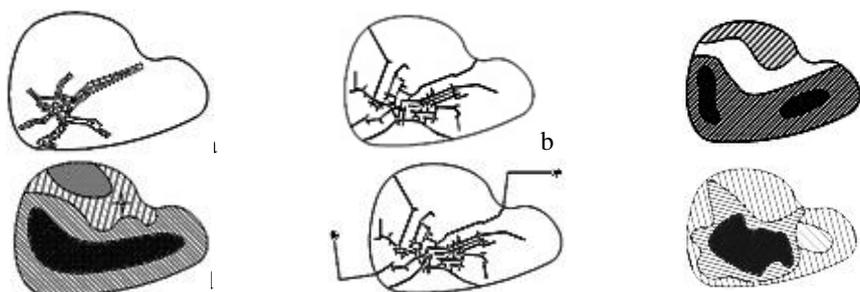


Рис. 1. Карты, использованные для трансформирования

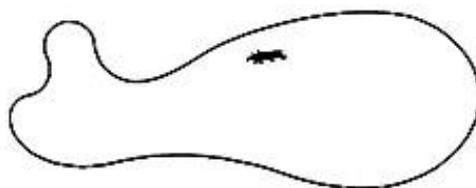


Рис. 2. Трансформированная ситуация

На рис. 2 показана целевая область с трансформированным положением земельного участка. Алгоритм трансформирования реализован следующим образом:

1) выполняется геометрическое отображение полигона земельного участка на полигон целевой местности. Это возможно, поскольку форма участка позволяет его вписать в область, причем сделать это можно бесчисленным числом способов. Процедура трансформирования может быть продолжена;

2) реализуется алгоритм картографического отображения. Здесь должны быть проверены базовые ограничения на размещение картографического объекта «земельный участок» на карте. Ограничение состоит в том, что этот участок должен быть вписан в один из существующих участков на тематической карте земельных участков. Участок вписан, если геометрическая его форма позволяет расположить его внутри существующего участка, имеющего тип «Запланировано для индивидуального строительства» или «Запланировано для муниципальных нужд». Если таких вариантов не найдено, процесс трансформирования завершается без результата. В данном примере существовало несколько вариантов решения, поэтому процедура продолжается;

3) выполняется алгоритм оценки топологических ограничений, заданных прикладной задачей. К ним относятся следующие:

- ◆ земельный участок должен быть смежным с автомагистралью;
- ◆ расстояние до наиболее удаленного по транспортной сети жилого здания не должно превышать заданного значения. Это значение является параметром метода трансформирования;
- ◆ земельный участок должен располагаться в зоне наилучшей сезонной доступности;
- ◆ расстояние до внешних сервисных центров не должно превышать заданного (через входной параметр) значения.

Работа алгоритма в данном примере завершилась нахождением нескольких вариантов отображения. Этого, однако, недостаточно для завершения трансформирования. Смысловая целостность образа не нарушена, если учтены допустимые преобразования частот вызова экстренных служб, распределение населения и уровня се-

зонной доступности. Существенное отличие этих показателей от зафиксированных в образе делает результат трансформирования недостоверным. Перечислим особенности применения алгоритмов для трансформирования распределений.

Алгоритм геометрического трансформирования распределения некоторого показателя состоит в построении в целевой области полигонов распределения. Это означает, что аналитиком должен быть найден источник информации, позволяющий построить распределение показателя в целевой области.

Алгоритм картографического отображения распределения показателя основан на кригинге [24]. Соответствующие программные процедуры имеют многие современные ГИС. Процедура кригинга строит поле распределения показателя по заданному набору пространственных данных [25].

Алгоритм прикладного уровня реализует сравнение распределений образа и целевой области для определения того, не является ли аномальным их совпадение. Методов обнаружения аномалий существует достаточно много, как и их программных реализаций.

Окончательно трансформирование считается выполненным достоверно, если имеется непустое множество земельных участков возможного размещения и отсутствуют аномалии распределения среднего числа вызовов, распределения населения и сезонной доступности.

Заключение. Интеллектуальные ГИС для ситуационного анализа должны использовать формы представления знаний, позволяющих контролировать повторное применение знаний к проблемным ситуациям. В данной работе предложен способ использования образов ситуаций для выполнения трансформирования образа в заданную область пространства. Показано место функций трансформирования в объектной модели образа, сформулированы свойства, которым должна удовлетворять программная реализация метода трансформирования. Ввиду того, что методы трансформирования отражают процедурное знание, с целью повышения эффективности использования базы знаний ГИС предложено использовать зонирование территорий, принятое в географии. Сформулирована оптимизационная задача, позволяющая находить наилучшую функцию трансформирования в базе знаний ГИС. Рассмотренный пример показал реализуемость предложенного способа трансформирования образов. Дальнейшие исследования проблемы переноса знаний и опыта авторы видят в поиске новых формализмов описания топологии пространства образов, методов поиска достоверных отображений ситуаций.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Де Мерс М.* Географические информационные системы. Основы. – М.: Дата+, 1999.
2. *Мотовилов Ю.Г., Гельфан А.Н.* Модели формирования стока в задачах гидрологии речных бассейнов. – М.: Изд-во РАН, 2018.
3. *Yue P., Jiang L.* BigGIS: How big data can shape next-generation GIS // 2014 The Third International Conference on Agro-Geoinformatics, Beijing. – 2014. – P. 1-6.
4. *Shashi S., Hui, X.* Encyclopedia of GIS. – Springer, New York, 2017.
5. *Belyakov S., Bozhenyuk A., Rozenberg I.* The intuitive cartographic representation in decision-making // World Scientific Proceeding Series on Computer Engineering and Information Science. – 2016. – Vol. 10. – P. 13-18.
6. *Фаликман М.* Когнитивная наука: основоположения и перспективы // Логос. – 2014. – № 1. – С. 316-330.
7. *Вагин В.Н., Головина Е.Ю., Загорянская А.А., Фомина М.В.* Достоверный и правдоподобный вывод в интеллектуальных системах. – М.: Физматлит, 2001.
8. *Timperley M., Mokhtar M., Bellaby G., Howe J.* Explanation-based learning with analogy for impasse resolution // Expert Systems with Applications. – 2016. – Vol. 61. – P. 181-191.
9. *Cao N., Gotz D., Sun J., Qu H.* DICON: interactive visual analysis of multidimensional clusters // IEEE Trans. Vis. Comput. Graph. – 2011. – Vol. 17 (12). – P. 2581-2590.

10. *Aamodt A., Plaza, E.* Case-Based Reasoning: Foundational Issues, Methodological Variations, and System Approaches // *AI Communications*. – 1994. – Vol. 7 (1). – P. 39-59.
11. *Gentner D., Holyoak K.J.* Reasoning and learning by analogy: introduction // *Am. Psychol.* – 1997. – Vol. 52 (1). – P. 32-34.
12. *Chattopadhyay R., Ye J., Panchanathan S., Fan W., Davidson I.* Multi-source domain adaptation and its application to early detection of fatigue // *ACM Trans. Knowl. Discov. Data*. – 2012. – Vol. 6 (4). – P. 18-22.
13. *Han J., Kamber M.* *Data Mining: Concepts and Techniques*. – Morgan Kaufmann Publishers, 2000.
14. *Duan L., Tsang I.W., Xu D.* Domain transfer multiple kernel learning // *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.* – 2012. – Vol. 34 (3). – P. 465-479.
15. *Wen Y.-M., Lu B.-L.* Incremental learning of support vector machines by classifier combining // *Proceedings of the 11th Pacific-Asia Conference on Knowledge Discovery and Data Mining, Nanjing*. – 2007. – P. 904-911.
16. *Long M., Wang J., Ding G., Sun J., Yu P.S.* Transfer feature learning with joint distribution adaptation // *IEEE 2013 Conference on Computer Vision, Sydney*. – 2013. – P. 2200-2207.
17. *Fruchterman T.M., Reingold E.M.* Graph drawing by force-directed placement // *Softw. Pract. Exp.* – 1991. – Vol. 21 (11). – P. 1129-1164.
18. *Heimerl F., Koch S., Bosch H., Ertl T.* Visual classifier training for text document retrieval // *IEEE Trans. Vis. Comput. Graph.* – 2012. – Vol. 18 (12). – P. 2839-2848.
19. *Stasch C., Scheider S., Pebesma E., Kuhn W.* Meaningful spatial prediction and aggregation // *Environmental Modelling & Software*. – 2014. – Vol. 51. – P. 149-165.
20. *Верещака Т.В., Баканова М.Ю.* Особенности технологии создания (обновления) специализированных топографических карт нефтегазового назначения // *Изв. вузов «Геодезия и аэрофотосъемка»*. – 2019. – Т. 63, № 6. – С. 678-688.
21. *Кресникова Н.И., Васильевых Н.А.* Применение данных дистанционного зондирования и геоинформационных технологий для обеспечения территориального планирования // *Изв. вузов «Геодезия и аэрофотосъемка»*. – 2018. – Т. 62, № 2. – С. 212-217.
22. *Паламарчук Н.А.* Зонирование территорий города // *Землеустройство, кадастр и мониторинг земель*. – 2013. – № 7 (103). – С. 48-52.
23. *Александров А.А.* Моделирование взрывоопасности и зонирование территории при хранении жидкого углеводородного топлива по критериям риска / под ред. В.И. Ларионова. – Уфа: Изд-во: БЭСТС, 2004.
24. *Демьянов В.В., Савельева Е.А.* *Геостатистика: теория и практика* / под ред. Р.В. Арутюняна; Ин-т проблем безопасного развития атомной энергетики РАН. – М.: Наука, 2010.
25. Визуализация и анализ географических данных на языке R. – <https://tsamsonov.github.io/r-geo-course/> (дата обращения: 29.11.2020).

REFERENCES

1. *De Mers M.* *Географические информационные системы. Основы* [Geographic information systems]. Moscow: Data+, 1999.
2. *Motovilov Yu.G., Gel'fan A.N.* *Модели формирования стока в задачах гидрологии речных бассейнов* [Models of runoff formation in the problems of river basin hydrology]. Moscow: Izd-vo RAN, 2018.
3. *Yue P., Jiang L.* BigGIS: How big data can shape next-generation GIS, *2014 The Third International Conference on Agro-Geoinformatics, Beijing*, 2014, pp. 1-6.
4. *Shashi S., Hui, X.* *Encyclopedia of GIS*. Springer, New York, 2017.
5. *Belyakov S., Bozhenyuk A., Rozenberg I.* The intuitive cartographic representation in decision-making, *World Scientific Proceeding Series on Computer Engineering and Information Science*, 2016, Vol. 10, pp. 13-18.
6. *Falikman M.* Когнитивная наука: основоположения и перспективы [Cognitive science: fundamentals and prospects], *Logos* [Logos], 2014, No. 1, pp. 316-330.
7. *Vagin V.N., Golovina E.Yu., Zagoryanskaya A.A., Fomina M.V.* *Достоверный и правдоподобный вывод в интеллектуальных системах* [Reliable and plausible conclusion in intelligent systems]. Moscow: Fizmatlit, 2001.
8. *Timperley M., Mokhtar M., Bellaby G., Howe J.* Explanation-based learning with analogy for impasse resolution, *Expert Systems with Applications*, 2016, Vol. 61, pp. 181-191.

9. Cao N., Gotz D., Sun J., Qu H. DICON: interactive visual analysis of multidimensional clusters, *IEEE Trans. Vis. Comput. Graph.*, 2011, Vol. 17 (12), pp. 2581-2590.
10. Aamodt A., Plaza, E. Case-Based Reasoning: Foundational Issues, Methodological Variations, and System Approaches, *AI Communications*, 1994, Vol. 7 (1), pp. 39-59.
11. Gentner D., Holyoak K.J. Reasoning and learning by analogy: introduction, *Am. Psychol.*, 1997, Vol. 52 (1), pp. 32-34.
12. Chattopadhyay R., Ye J., Panchanathan S., Fan W., Davidson I. Multi-source domain adaptation and its application to early detection of fatigue, *ACM Trans. Knowl. Discov. Data.*, 2012, Vol. 6 (4), pp. 18-22.
13. Han J., Kamber M. Data Mining: Concepts and Techniques. Morgan Kaufmann Publishers, 2000.
14. Duan L., Tsang I.W., Xu D. Domain transfer multiple kernel learning, *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, 2012, Vol. 34 (3), pp. 465-479.
15. Wen Y.-M., Lu B.-L. Incremental learning of support vector machines by classifier combining, *Proceedings of the 11th Pacific-Asia Conference on Knowledge Discovery and Data Mining, Nanjing.*, 2007, pp. 904-911.
16. Long M., Wang J., Ding G., Sun J., Yu P.S. Transfer feature learning with joint distribution adaptation, *IEEE 2013 Conference on Computer Vision, Sydney*, 2013, pp. 2200-2207.
17. Fruchterman T.M., Reingold E.M. Graph drawing by force-directed placement, *Softw. Pract. Exp.*, 1991, Vol. 21 (11), pp. 1129-1164.
18. Heimerl F., Koch S., Bosch H., Ertl T. Visual classifier training for text document retrieval, *IEEE Trans. Vis. Comput. Graph.*, 2012, Vol. 18 (12), pp. 2839-2848.
19. Stasch C., Scheider S., Pebesma E., Kuhn W. Meaningful spatial prediction and aggregation, *Environmental Modelling & Software*, 2014, Vol. 51, pp. 149-165.
20. Vereshchaka T.V., Bakanova M.Yu. Osobennosti tekhnologii sozdaniya (obnovleniya) spetsializirovannykh topograficheskikh kart neftegazovogo naznacheniya [Features of technology for creating (updating) specialized topographic maps for oil and gas purposes], *Izv. vuzov «Geodeziya i aerofotos"emka»* [Izvestiya vuzov "Geodesy and aerial photography"], 2019, Vol. 63, No. 6, pp. 678-688.
21. Kresnikova N.I., Vasil'evykh N.A. Primenenie dannykh distantsionnogo zondirovaniya i geoinformatsionnykh tekhnologiy dlya obespecheniya territorial'nogo planirovaniya [Application of remote sensing data and geoinformation technologies to ensure territorial planning], *Izv. vuzov «Geodeziya i aerofotos"emka»* [Izvestiya vuzov "Geodesy and aerial photography"], 2018, Vol. 62, No. 2, pp. 212-217.
22. Palamarchuk N.A. Zonirovanie territoriy goroda [Zoning of city territories], *Zemleustroystvo, kadastr i monitoring zemel'* [Land management, cadastre and land monitoring], 2013, No. 7 (103), pp. 48-52.
23. Aleksandrov A.A. Modelirovanie vzryvoopasnosti i zonirovanie territorii pri khraneni zhidkogo uglevodorodnogo topliva po kriteriyam riska [Modeling of explosion hazard and zoning of the territory during storage of liquid hydrocarbon fuel according to risk criteria], ed. by V.I. Larionova. Ufa: Izd-vo: BESTS, 2004.
24. Dem'yanov V.V., Savel'eva E.A. Geostatistika: teoriya i praktika [Geostatistics: theory and practice], ed. by R.V. Arutyunyan; In-t problem bezopasnogo razvitiya atomnoy energetiki RAN. Moscow: Nauka, 2010.
25. Vizualizatsiya i analiz geograficheskikh dannykh na yazyke R. Available at: <https://tsamsonov.github.io/r-geo-course/> (accessed 29 November 2020).

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор Л.К. Самойлов.

Беляков Станислав Леонидович – Южный федеральный университет; e-mail: beliacov@yandex.ru; 347922, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44; кафедра информационно-аналитических систем безопасности; профессор.

Белякова Марина Леонтьевна – e-mail: mlbeliacova@sfedu.ru; доцент.

Зубков Сергей Александрович – e-mail: szubkov@sfedu.ru; с.н.с.

Голова Никита Александрович – e-mail: ngolova@sfedu.ru; аспирант.

Яворчук Кирилл Сергеевич – e-mail: kyavorchuk@sfedu.ru; аспирант.

Belyakov Stanislav Leonidovich – Southern Federal University; e-mail: beliacov@yandex.ru; 44, Nekrasovsky, Taganrog, 347928, Russia; phone: +78634371695; the department of information and analytical security system; professor.

Belyakova Marina Leontievna – e-mail: mlbeliacova@sfedu.ru; associate professor.

Zubkov Sergey Alexandrovich – e-mail: szubkov@sfedu.ru; senior researcher.

Golova Nikita Alexandrovich – e-mail: ngolova@sfedu.ru; graduate student.

Yavorchuk Kirill Sergeevich – e-mail: kyavorchuk@sfedu.ru; graduate student.

УДК 004.932.2

DOI 10.18522/2311-3103-2020-5-171-184

А.Н. Каркищенко, В.Б. Мнухин

**О ВЛИЯНИИ ЗАШУМЛЕНИЯ НА РАСПОЗНАВАНИЕ
СИММЕТРИИ 3-ГО ПОРЯДКА В ГЕКСАГОНАЛЬНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЯХ***

Излагается алгебраический подход к представлению и обработке цифровых изображений, заданных на гексагональных решетках. Описанный подход основан на представлении изображений как функций на конечных полях «целых Эйзенштейна». Как оказывается, элементы таких полей естественно соответствуют пикселям гексагональных изображений определенных размеров. Описаны экспоненциальное и логарифмическое преобразования в полях Эйзенштейна. Приведен метод обнаружения центров вращательной симметрии 3-го порядка на полутоновых изображениях и введена соответствующая нормированная мера симметрии. Основной целью работы является исследование влияния зашумления на изображении на качество оценки симметрии с помощью введенной меры. Фактор зашумленности необходимо принимать во внимание, поскольку уменьшение меры может быть вызвано не только неполной симметрией реального объекта, но и искажениями из-за шумов, что практически всегда имеет место. Очевидно, что это отличие будет пропорционально уровню шумовой составляющей. В работе получены аналитические оценки влияния шума на критерий обнаружения симметрии. Если изображения подвержены случайному зашумлению, то мера симметрии отдельных областей изображения будет случайной величиной, закон распределения которой определяется законами распределения шумовых составляющих. При этом в работе делается стандартное для обработки изображений предположение о модели нормальной и независимой зашумленности функции яркости. Особенность введенной меры симметрии третьего порядка не позволяет напрямую применить стандартные методы для получения вероятностных оценок. С этой целью была проведена оценка кумулятивной функции распределения вероятностей, на основании которой получено выражение для вероятностей отклонения меры симметрии от истинного значения на заданную величину. В силу сделанных априорных предположений полученную оценку следует рассматривать как достаточно «осторожную» и можно ожидать, что в реальности разброс меры, вызванный шумами на изображении, будет существенно меньше, чем теоретически установленные границы.

Симметрия 3-го порядка; гексагональное изображение; числа Эйзенштейна; конечные поля; полярно-логарифмические координаты; полярное представление; нормальное зашумление; распределение меры симметрии.

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проект № 19-07-00873.