Применение нечеткого ситуационного анализа для решения задачи размещения

Application of fuzzy situational analysis to solve the placement problem

Камынина / Kamynina N.
Надежда Ростиславовна
(rector@miigaik.ru)
доктор экономических наук,
кандидат технических наук, доцент.
ФГБОУ ВО «Московский государственный университет геодезии и картографии» (МИИГАиК), ректор.
г. Москва

Ознамец / Oznamets V.
Владимир Владимирович
(voznam@bk.ru)
кандидат технических наук.
МИИГАиК, заведующий кафедрой геодезии.
г. Москва

Цветков / Tsvetkov V.
Виктор Яковлевич
(cvj2@mail.ru)
доктор технических наук, профессор.
Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт информатизации, автоматизации и связи на железнодорожном транспорте (АО «НИИАС»), заместитель руководителя центра стратегического анализа и развития.
г. Москва

Ключевые слова: геоинформатика – geoinformatics; геодезия – geodesy; космические исследования – space research; возвращаемый аппарат – reentry vehicle; выбор места посадки – choice of landing site; сравнительный нечеткий анализ – comparative fuzzy analysis; информационная ситуация – information situation; нечеткая ситуация – fuzzy situation; пространственная четкая ситуация – spatial clear situation.

Статья раскрывает методику нечеткого ситуационного анализа для решения задачи размещения. В работе применяются две модели: четкой информационной ситуации и нечеткой информационной ситуации. Базовой информацией служат результаты комплексных геодезических обследований и критерии заказчика, содержащие нечеткую (интервальную) информацию. Сущность методики заключается в построении лингвистических переменных для описания нечетких ситуаций, задаваемых нечеткими критериями. Методика включает нечеткую оптимизацию, которая заменяет задачу глобальной дискретной оптимизации на выбор рационального решения. Четкая пространственная ситуация описывается с помощью результатов геодезического обследования. Нечеткая пространственная ситуация строится по нечетким критериям заказчика и сопоставляется с данными каждого возможного места посадки.

The article reveals the technique of fuzzy situational analysis for solving the placement problem. The work uses two models of a clear information situation and a fuzzy information situation. The basic information is the results of complex geodetic surveys and the customer's criteria containing fuzzy (interval) information. The essence of the technique lies in the construction of linguistic variables for describing fuzzy situations defined by fuzzy criteria. The technique includes fuzzy optimization, which replaces the global discrete optimization problem with the choice of a rational solution. A clear spatial situation is described using the results of a geodetic survey. Fuzzy spatial is built according to the customer's fuzzy criteria and compared with the data of each possible landing site.

Введение

В региональном управлении существует серия задач выбора места размещения ресурсов или пространственного ареального объекта [1–3]. Задачи такого рода решались известными учеными Иоганом фон Тюнненом [4, 5], В. Лаунхардом [6], В. Кристаллером [7]. При космических исследованиях существует необходимость выбора допустимого и оптимального места посадки возвращаемого космического аппарата. Для

решения задач пространственного выбора применяют различные методы, простейшим среди которых является комбинаторный метод [8, 9]. Однако его недостаток в том, что он применим для качественно сопоставимых объектов. Второй недостаток в том, что он проводит оптимизацию при наличии только четкой информации. Если через участок проходит материальный поток, то можно для оценки его значимости использовать теорию массового обслуживания [10]. Но она также не применима при нечеткой информации. При этом надо различать понятия информационная неопределенность [11] и информационная нечеткость [12]. Информационная неопределенность существует при недостатке информации или при ее отсутствии. Информационная нечеткость характеризуется наличием информации, но эта информация неточна, избыточна, противоречива, либо имеет интервальный (нечеткий) характер. В условиях нечеткой информации традиционно применяют теорию возможностей [13, 14]. Условием выбора места посадки является отсутствие четкой информации. Поэтому данная задача представляет практический и теоретический интерес. Она решается на основе геодезических обследований с последующей обработкой полученной информации.

Теоретическое обоснование

Исходными условиями для решения задачи являются n возможных мест посадки возвращаемых аппаратов, которые необходимо обследовать и оценить. Места посадки можно определить как счетное множество X где $x_i \epsilon X$ модели пространственных информационных ситуаций, доступных для посадки возвращаемого аппарата (ВА) или места возможных посадок. Такими образом в данной работе понятия «информационная пространственная ситуация» и «место посадки ВА» являются синонимами.

Информационной пространственной ситуацией назовем информационную модель, описывающую участок территории и содержащую кроме пространственных данных дополнительную тематическую информацию применительно к решаемой задаче. В нашем случае тематическая информация связана с критериями возможной посадки возвращаемого аппарата на земную поверхность. Места возможной посадки оценивают по совокупности критериев CR.

$$CR=\{Op(x_i\ m),\ F\ (x_i p),\ Cu(x_i\ n)\}. \qquad (1)$$

В выражении (1) обозначение {} означает совокупность. В этой совокупности $Op(x_i\ m)$, – оппозиционные критерии допустимости /недопустимости, m – число оппозиционных критериев, $F\ (x_i p)$ – критерии нечеткости или ситуационные критерии, p – число критериев нечеткости,

$Cu(x_i\ j)$ – критерии второго порядка важности, которые существенно не влияют на ситуацию оценивания, но при равенстве параметров оценки могут использоваться для сравнения, j – число этих критериев.

Использование критериев $Op(x_i\ m)$ предшествуют использованию критериев нечеткости. Оппозиционные критерии допустимости имеют два оппозиционных значения «да» (1), «нет» (0). Если $Op(x_i\ m)=0$ при любом m, то площадка x_i бракуется. Если $Op(x_i\ m)=1$, то производят дальнейшую оценку по критерию $F\ (x_i p)$. Эти условия имеют логическую форму записи.

$$\exists\ x_i\ Op(x_i\ m)= 0 \rightarrow \text{отбраковка } x_i \qquad (2)$$

$$\forall\ x_i\ Op(x_i\ m)= 1 \rightarrow \text{анализ } x_i \qquad (3)$$

Выражение (2) означает, что если существует площадка x_i как потенциальное место посадки, для которой хоть один критерий $Op(x_i\ m)=0$, то эта площадка не рассматривается как возможное место посадки. Выражение (3) означает, что для всех площадок x_i, для которых все критерии $Op(x_i\ m)=1$, место x_i рассматривается как возможное место посадки и подвергается анализу с позиции нечетких множеств.

Оценка мест возможной посадки x_i, x_n, на основе нечетких критериев $F(x_i\ p)$, основана на использование аппарата теории возможностей. Первоначальное название этой теории было нечеткие множества, но спустя некоторое время ее автор Л. Заде предложил более содержательное название – теория возможностей. В настоящее время оба термина имеют равную силу. Нечеткие критерии $F(x_i\ p)$ описываются значениями лингвистических переменных и термов для мест посадки. При наличии четкой информации применяют модель четкой информационной ситуации [15]. Пространственная информационная ситуация обладает четкостью и описывает не только объект местности, но и все его важнейшие связи и пространственные отношения [16]. Применение модели информационной ситуации для анализа дает основание говорить о ситуационном анализе. В данной работе понятием ситуационный анализ будем обозначать анализ с использованием моделей информационной ситуации. Нечеткая информационная ситуация su, как и положено нечеткой модели, описывает отдельные факты реальной ситуации. При этом в качестве значений лингвистических переменных она использует интервальные или трапециевидные числа. Лингвистические переменные y имеют различные степени принадлежности базовому множеству значений U.

$$su= \{(\mu_s(y_f)\},\ y_f \epsilon U, \qquad (4)$$

$$y_f= \{y_{sfl}\ (T_{fl})\};\ \mu_s \in [0,\ 1] \qquad (5)$$

Выражение (4) говорит о том, что su выражена через функцию принадлежности μ и лингвистические переменные y_f для данной su.

Выражение (5) говорит о том, что значения лингвистических переменных определяется через термы для данной ситуации. Символ y_{sfl} означает, что лингвистическая переменная описывает ситуацию s для критерия f при термальном множестве T_{fl}.

В выражениях (4), (5) $f = 1, ..., P;$ – множество нечетких критериев оценки ситуации, $l = 1, ..., q_f$, – множество термов данного критерия; T_{fl} – значение терма лингвистической переменной y_f по критерию f и по значению l внутри этого критерия.

Каждое потенциальное место посадки ВА будет характеризоваться набором значений лингвистических переменных, описывающих параметры мест размещения, и будет описано с помощью соответствующей нечеткой ситуации su_i, $i=1\ n$. Можно сделать следующий шаг и связать нечеткую ситуацию su_i, с четкой ситуацией (x_i)

$$su\ (x_i)= \{(\mu_{s(xif)}\}, = \{\mu_{s(xfl)}\ (T_{fl})\} \qquad (6)$$

Выражение (6) говорит о том, что нечеткую абстрактная ситуация su_i, связанная с четкой ситуацией (x_i), выражается через функцию принадлежности $\mu s(x_{if})$ и термальные множества T_{fl}.

Оценка [17] размещения определяется на основе совокупности критериев $F_1, F_2,...F_P$. Следует отметить, что исходные условия не являются четкими, в силу этого единственное (глобальное) оптимальное решение получить сложно. Поэтому можно говорить только о локальном решении, которое можно рассматривать как целесообразное. Данное решение является условным. Условное решение может измениться при изменении условий или включении новых площадок в анализируемую совокупность.

Ситуация $su(x_i)$ из (6) определяется через термальное множество (T_{fl}). Значения μ вычисляются по формулам теории нечетких множеств с учетом тенденции изменения термального множества T_{fl}. Тенденции имеют два направления. Одни направлены на увеличение, другие на уменьшение. В силу этого оценки лингвистических переменных вычисляются согласно [2, 17] для этих тенденций. При тенденции уменьшения термального множества, применяют формулу (5)

$$\mu_{su}(y_k)=T_1\ q_k/q_k + T_2\ (q_k-1)/q_k + T_k/q_k \qquad (7)$$

При тенденции роста термального множества, применяют формулу (8)

$$\mu_{su}(y_k)= T_k\ q_k/q_k + T_{k-1}\ (q_k-1)/q_k + T_1/q_k \qquad (8)$$

В формулах (7) и (8) величина q_k определяется количеством термов для критерия F. Если имеется p критериев: $F_1, F_2,...F_p$, то лучшим считается решение, удовлетворяющее большему числу критериев. Отсюда [17] правило выбора условного рационального решения может быть записано как правило пересечения нечетких множеств. Операция пересечения нечетких множеств эквивалентна операция min, для функций принадлежности согласно выражению (9).

$$\mu_D(x_l)=\min \mu_{su}(y_k)\ \ l=1..q \qquad (9)$$

В качестве локальной рациональной альтернативы места посадки будет выбираться объект x^*, имеющий наибольшее значение функции принадлежности согласно выражению, если функция полезности характеризует максимум (10).

$$\mu_D(x^*)=\max \mu_D(x_i)\ \ i=1..n \qquad (10)$$

Или минимальное значение, если лингвистическая функция характеризует риск (11).

$$\mu_D(x^*)=\min \mu_D(x_i)\ \ i=1..n \qquad (11)$$

Экспериментальные работы

Рассмотрим экспериментальные работы по выбору мест посадки. На основе предварительного выбора выделено 4 возможных места посадки: x_1 – Оренбург; x_2 – Орск; x_3 – Рубцовск; x_4 – Энгельс. Общая задача найти доступное место посадки ВА и выбрать оптимальное среди них. В таблице 1 «оппозиционные критерии допустимости» приведены фактические критерии, использованные в данном исследовании при оценке мест возможной посадки ВА.

В результате проверки мест по таблице 1 выявлено, что два участка из четырех не отвечают оппозиционным критериям допустимости. Выявлено, что выражению (2), определяющему необходимость отбраковки площадки, соответствуют места обследования x_2 – Орск и x_4 – Энгельс

$$O_p(x_2\ 1)= 0\rightarrow \text{отбраковка } x_2\ O_p(x_{4\ 5,6})= 0\rightarrow \text{отбраковка } x_4$$

В районе посадочной площадки Орска на расстоянии 3 км проложен газопровод, который представляет угрозу как при случайном взрыве, так и при ударе об него ВА. В районе посадочной площадки Энгельс на бывшем полигоне для бомбометания находятся глубокие воронки, которые представляют опасность при посадке. Кроме того, в земле находятся неразорвавшиеся боеприпасы, которые могут детонировать.

На дальнейшем этапе выполнялось аналитическое исследование критериев и их описание в соответствии с правилами теории нечетких множеств. Были проанализированы критерии места посадки и оформлены в табличном виде. Заказчиком были заданы девять критериев F места посадки возвращаемого аппарата (ВА), которые были систематизированы и описаны в термина лингвистических переменных. Были проведены оценки мощности термальных

Таблица 1

Оппозиционные критерии допустимости

m	Фактор	$Op(x_i\ m)$ =1	$Op(x_i\ m)$= 0
1	Вредное химическое производство	Нет	Менее 30 км
2	Объекты возможных чрезвычайных ситуаций	Нет	Расстояние менее 10 км
3	Множество крупных валунов	Нет	Имеются
4	Каменистый грунт	Нет	Имеется
5	Множество глубоких ям (от 3 и более глубина и от 3 м ширина) ям	Нет	Имеется
6	Не разорвавшиеся боеприпасы	Нет	Есть
7	Пожароопасная зона	Нет	Имеется
8	Плотные лесные массивы	Нет	Да
9	Непроходимые болота	Нет	Да
10	Сложно проходимые территории	Нет	Имеется
11	Пески барханного типа	Нет	Имеется

Таблица 2

Термальное множество «Высота над уровнем моря»

*F*1	отлично	хорошо	плохо	Оч. плохо
Высота над уровнем моря	100–500	от 0 до 100	500–1000	>1000

Таблица 3

Термальное множество «уклоны на поверхности площадки»

*F*2	Оч плохо	плохо	допустимо	хорошо	отлично
Уклоны	>12	5–12 п	5–12 х	0–5	нет

Таблица 4

Термальное множество «Здания, сооружения»

*F*3	отлично	хорошо	допустимо	плохо	Оч плохо
Здания, сооружения	нет	Временные сооружения	Отдельные здания х	Отдельные здания п	Застройки

Таблица 5

Термальное множество «Водные объекты»

*F*4	отлично	хорошо	плохо
Водные объекты	нет	Есть х	Есть п

Таблица 6

Термальное множество «Поверхность посадочной площадки»

*F*5	отлично	хорошо	допустимо	плохо	Оч плохо
Поверхность	Земляная	Твердый песчаник	Суглинок	Прох бол	Галька с песком

Таблица 7

Термальное множество «Растительность»

*F*6	отлично	хорошо	допустимо	плохо	Очень плохо
Растительность	Травянистая	Травянистая и кустарниковая 5–12	Редколесье х	Редколесье п	Рощи

Таблица 8

Термальное множество «Удаленность пожарной части»

*F*7	отлично	хорошо	допустимо	плохо
Удаленность ПЧ	До 5 км	До 15 км	До 30 км	Более 30 км

Таблица 9

Термальное множество «Удаленность аэродрома»

*F*8	отлично	хорошо	допустимо	плохо
Удаленность аэродрома	До 10 км	До 20 км	До 35 км	Более 35 км

Таблица 10

Термальное множество «доступ к автодороге»

*F*9	отлично	хорошо	допустимо	плохо
Доступ к дороге	До 3 км	До 6 км	До 10 км	Более 10 км

множеств. Результаты предварительного аналитического исследования представлены в таблицах 2–10.

Информационная ситуация «5–12 п» означает уклон 5–12 на удалении более 2,5 км от центра района посадки, общая площадь превышает 5% площади полигона. Информационная ситуация «5–12 х» означает уклон на удалении более 2,5 км от центра района посадки, общая площадь не превышает 5% площади полигона.

Отдельные здания х – Отдельные здания на удалении более 2,5 км от центра района. Отдельные здания п – Отдельные здания на удалении менее 2,5 км от центра района.

Есть х – Реки, озёра, каналы и пруды на удалении более 2,5 км от центра района, если их площадь не превышает 5% площади полигона. Есть п – Реки, озёра, каналы и пруды на удалении более 2,5 км от центра района, если их площадь превышает 5% площади полигона.

«Прох бол» – Проходимые болота на удалении более 2,5 км от центра района.

«Редколесье х» – Редколесье на удалении более 2,5 км от центра района, если его площадь не превышает 5% площади полигона. «Редколесье п – Редколесье на удалении более 2,5 км от центра района, если его площадь превышает 5% площади полигона.

На следующем этапе выполнялись геодезические обследования объектов, определенных заказчиком как потенциальные места посадок ВА. Осуществлялся выезд в поле, проводились необходимые измерения и собиралась информация, отвечающая требованиям таблиц 2–10 (нижние строки). На основе предварительного обследования были проведены работы на четырех возможных местах посадки, определенных заказчиком. В процессе геодезических работ были обследованы следующие объекты x_1 – Оренбург; x_2 – Орск; x_3 – Рубцовск; x_4 – Энгельс. После этого места посадки ВА оценены в соответствии с 9 вышеупомянутыми критериями. Число критериев может быть любым, его задает заказчик. На основе геодезических обследований были составлены подробные отчеты в среднем по 28–35 Мбайт с фотофиксацией и качественными и количественными характеристиками обследованных территорий. Количественные и семантические характеристики обследованных объектов были трансформированы в показатели термальных множеств таблиц 2–10. Результаты итоговой трансформации характеристик обследования в показатели термальных множеств даны в таблице 11.

В таблице 11 левый столбец «*L*» показывает мощность термального множества для данной лингвистической переменной в соответствии с таблицами 2–10. В таблице 11 третий столбец слева содержит название лингвистической переменной. Две верхние строки таблицы 11 четырех столбцов справа показывают соответствие между символическим обозначением места и его названием. В таблице 11 приведены данные на все 4 обследованных места. Однако после обследования была проведена отбраковка по оппозиционным критериям допустимости (таблица 1).

После отбраковки формируют данные и обследуют неотбракованные участки. Задаем нечеткие ситуации для каждого из мест размещения объекта. Этот этап – тривиальный и описан в ряде работ [2]. Важным является то, что каждому критерию соответствуют термы множества, которые определяются таблицами 1–9. Названия термов могут быть любые. Главное при их формировании – это обеспечение информа-

Таблица 11

Параметры мест посадки ВА

		Ситуации	x_1	x_2	x_3	x_4
L	*F*	Места	Оренбург	Орск	Рубцовск	Энгельс
4	1	Высота	отлично	хорошо	отлично	хорошо
5	2	Уклоны	хорошо	хорошо	отлично	хорошо
5	3	Здания, сооружения	отлично	хорошо	хорошо	допустимо
3	4	Водные объекты	хорошо	хорошо	хорошо	хорошо
5	5	Поверхность	хорошо	хорошо	отлично	хорошо
5	6	Растительность	хорошо	хорошо	допустимо	отлично
4	7	Удаленность ПЧ	плохо	плохо	хорошо	Допустимо
4	8	Удаленность аэродрома	плохо	допустимо	плохо	хорошо
4	9	Доступ к автодороге	отлично	хорошо	отлично	отлично

ционного соответствия [18] между количественными и качественными характеристиками.

Для каждой ситуации и для каждой лингвистической переменной рассчитаем значения $\mu_{s_i(y_k)}(y_k)$, $k=1$,..., P, по формулам (7–8), а также найдем пересечение нечетких множеств по формуле (9). Результаты показаны в таблице 12.

В результате обработки, представленной в таблице 12, оказалось, что два места посадки имеют разные оценки. Каждую из площадок можно выбирать для эксплуатации? Из формулы (11) следует, что лучшей будет площадка x_1 Оренбург. Таким образом, ситуационный анализ с использованием нечетких информационных ситуаций дает возможность выбрать место наиболее целесообразного размещения места посадки. Другим результатом является то, что две площадки готовы для использования. И, если у заказчика есть свои дополнительные критерии, он может с равным правом выбирать любую из двух или обе для эксплуатации.

Это решение получено в предположении того что критерии выбора места F_1, F_2, F_3, F_4 – равнозначны. Обычно неравнозначность (внутри критерия) заложена в термы. Другая неравнозначность (между критериями) задается техническим заданием. В этом случае для перераспределения результатов вводят веса факторов. В этом случае каждому критерию приписывается вес ($1>\alpha_f>0$), который задает заказчик. Вес определяется важностью критерия. Чем значимее критерий, тем выше его вес. Для определения веса вводят коэффициенты N относительной важности на основе экспертного оценивания. Важность может быть оценена любым числом, но затем этот числовой ряд нормируют и превращают в весовой ряд. Затем необходимо учесть влияние коэффициентов α_f на соответствующие значения лингвистических переменных. Этот учет осуществляется путем преобразования

$$\mu^* s(y_f) = \alpha_f \mu_s(y_f) \qquad (12)$$

В рассматриваемом случае веса не задавались, поэтому результат таблицы 11 является окончательным. На практике может возникнуть случай. Когда заказчик хочет уточнить какая из возможных площадок лучше. В этом случае проводят анализ по дополнительным критериям, которые не вошли в таблицы 1–9. В нашем случае таким критерием является расстояние до ближайшей железнодорожной станции.

Эта информация была получена в ходе комплексного геодезического обследования. Оренбург – ближайшей станцией ж/д к району посадки является станция «Чёрный отрог», расположенная в 44,4 км от его центра. Рубцовск – ближайшей станцией ж/д к району посадки является станция «Рубцовск», расположенная в 96 км (по кратчайшему расстоянию) от его центра. Исходя из этих критериев и без учета иных критериев, предпочтительной площадкой является площадка Оренбург.

Возможно проведение реставрационных работ на забракованных площадках. Для площадки Энгельс это невозможно пункт 6 таблице 0. Для площадки x_2 Орск, это возможно, но требует дополнительных затрат. Возможны два решения: сдвиг центра площадки на 25 км от газопровода; перекладка газопровода на

Таблица 12

Расчет лингвистических переменных для допустимых площадок

Места	Линг пер	*K*1	*K*2	*K*3	*K*4	*K*5	*K*6	*K*7	*K*8	*K*9	$\mu_D(x_l)$
x_1	$\mu_1(y_k)$	1/4	2/5	1/5	2/3	2/5	2/5	1	1	1/4	1/4
x_3	$\mu_3(y_k)$	1/4	1/5	2/5	2/3	1/5	3/5	2/4	1	1/4	1/5

Таблица 13

Расчет лингвистических переменных для расширенного варианта площадок

Места	Линг пер	*K*1	*K*2	*K*3	*K*4	*K*5	*K*6	*K*7	*K*8	*K*9	$\mu_D(x_l)$
x_1	$\mu_1(y_k)$	1/4	2/5	1/5	2/3	2/5	2/5	1	1	1/4	1/4
x_2	$\mu_{\hat{s}2}(y_k)$	2/4	2/5	2/5	2/3	2/5	2/5	1	¾	2/4	2/5
x_3	$\mu_3(y_k)$	1/4	1/5	2/5	2/3	1/5	3/5	2/4	1	1/4	1/5

безопасное расстояние. Если это мероприятие выполнить, то получается расширенная таблица 13 для анализа трех мест возможной посадки.

Из формулы (11) и таблицы 13 следует, что в этом случае лучшей площадкой для места посадки из трех возможных будет площадка x_2 Орск. Следовательно, есть основание подумать о возможности реставрации данной площадки.

Обсуждение

Данная методика позволяет принимать рациональные решения при информационной нечеткости для трапециевидных и интервальных переменных, которые характеризуют информационную ситуацию. Однако результаты оценивания являются условными. Условность определяется конечным набором критериев оценки и, как показывают таблицы 12 и 13, количеством сравниваемых объектов. При изменении количества критериев или совокупности объектов исследования результат оценки может изменится (а может и не изменится). Результаты методики нельзя назвать оптимальными. Их можно назвать целесообразными. Это естественно, так как при неполной информации нет гарантий получения оптимального решения. Тем не менее методика применим в ситуациях, когда классические методики бессильны.

Заключение

Предложенная методика ситуационного оценивания позволяет получать оценки ситуаций при нечеткой информации. Она применим тогда, когда классические оптимизационные методики не дают результат. Интерес представляет философски-математический аспект взаимосвязи качества и количества. Эта взаимосвязь начинается на уровне ординальной шкалы, то есть на уровне ранжирования качеств, которым соответствуют нечеткие числа: интервальные или трапециевидные. Методика требует дальнейших исследований и развития. Например, пока существует произвол в выборе количества термов. В то же время методика является новой в области ситуационного анализа. Исследования показали, что целесообразно введение понятий и моделей «пространственная информационная ситуация», «нечеткая пространственная информационная ситуация», они позволяют решать новые задачи и расширяют возможности пространственного анализа.

Литература

1. Ворокова, Н. Х. Совершенствование регионального размещения сельскохозяйственного производства / Н.Х Ворокова, А.Е. Сенникова // Экономика и предпринимательство. – 2019. – № 7. – С. 413–416.

2. Розенберг, И. Н. Решение задач размещения с нечеткими данными с использованием геоинформационных систем / И.Н. Розенберг, Т.А. Старостина. – М.: Научный мир, 2006. – 208 с.

3. Цветков, В. Я. Геоинформационный анализ задач размещения / В.Я. Цветков, С.Г. Семушкина // Вестник Московского государственного областного педагогического университета. Серия Экономика. – 2009. – № 4. – С. 61–64.

4. Блауг, М. 100 великих экономистов до Кейнса / М. Блауг. – СПб.: Экономикус, 2008. – 352 с.

5. Горбунов, В. С. Использование модели Й. фон Тюнена в современной региональной экономике / В.С. Горбунов // Московский экономический журнал. – 2017. – № 2. – С. 1–10.

6. Launhardt, W. Mathematische Begrьndung der Volkswirthschaftslehre / W. Launhardt. – Leipzig: W. Engelmann, 1885. – 216 p.

7. Christaller, W. Die zentralen Orte in Suddeutschland / W. Christaller. – Jena: Gustav Fischer, 1933.

8. Csoke M. E. The Facility Location Problem. – 2015.

9. Комбинаторные методы и алгоритмы решения задач дискретной оптимизации большой размерности / В.Р. Хачатуров [и др.]. – М.: Наука, 2000. – 360 с.

10. Ознамец, В. В. Размещение пространственных объектов с использованием теории массового обслуживания / В.В. Ознамец // ИТНОУ: Информационные технологии в науке, образовании и управлении. – 2018. – № 3. – С. 87–94.

11. Цветков, В. Я. Информационная неопределенность и определенность в науках об информации / В.Я. Цветков // Информационные технологии. – 2015. – Т. 21, № 1. – С. 3–7.

12. Hudec, M. Fuzziness in information systems / M. Hudec – Cham: Springer International Publishing, 2016. – 198 p.

13. Zimmermann, H. J. Fuzzy set theory—and its applications / H.J. Zimmermann. – Luxemburg: Springer Science & Business Media, 2011.

14. Ebrahimnejad, A. Fuzzy set theory. Fuzzy Sets-Based Methods and Techniques for Modern Analytics / A. Ebrahimnejad, J.L. Verdegay. – Cham: Springer, 2018.

15. Цветков, В. Я. Модель информационной ситуации / В.Я. Цветков // Перспективы науки и образования. – 2017. – № 3 (27). – С. 13–19.

16. Савиных, В. П. Информационные пространственные отношения / В.П. Савиных // Образовательные ресурсы и технологии. – 2017. – №1 (18). – С. 79–88.

17. Мелихов, А. Н. Ситуационные советующие системы с нечеткой логикой / А.Н. Мелихов, Л.С. Берштейн, С.Я. Коровин. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит, 1990. – 272 с.

18. Ожерельева, Т. А. Информационное соответствие и информационный морфизм в информационном поле / Т.А. Ожерельева // ИТНОУ: Информационные технологии в науке, образовании и управлении. – 2017. – № 4. – С. 86–92.