УДК 332.519.8

В.А.КИСЕЛЁВ, *канд. техн. наук, доцент, kisselevva@mail.ru*
А.Г.ШАБАЕВ, *студент, 8-921-58-92-43*
Санкт-Петербургский государственный горный университет

V.A.KISELEV, *PhD in eng. sc., associate professor, kisselevva@mail.ru*
A.G.SHABAEV, *student, 8-921-58-92-43*
Saint Petersburg State Mining University

МЕТОДИКА РАЙОНИРОВАНИЯ ПО ЗНАЧЕНИЯМ ЦЕНООБРАЗУЮЩИХ ФАКТОРОВ КАДАСТРОВОЙ СТОИМОСТИ ЗЕМЕЛЬ НАСЕЛЕННЫХ ПУНКТОВ НА ОСНОВЕ ТЕОРИИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ В МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОЙ СРЕДЕ

Рассмотрена методика создания карт многопризнакового районирования способом ранжирования кадастровых кварталов на основе теории принятия решений.

***Ключевые слова*:** районирование, геоинформационные системы, ранжирование, теория принятия решений, отношение предпочтений, парето-оптимальные варианты, *N*-модель, ГИС-проект, анализ сетевых структур, тематическая карта.

METHOD OF PRICE ZONING LAND SETTLEMENTS BASED ON THE THEORY OF DECISION MAKING IN A MULTI-DIMENSIONAL DATA

The method of mapping a lot of price factors zoning on basis of the decision-making theory by ranking quarters.

***Key words*:** zoning, geographic information systems, rankings, decision theory, the ratio of preferences, pareto-optimal variants, N-model, the GIS project, and analysis of network structures, thematic map.

Одной из задач районирования является создание карт, отражающих разделение некоторой территории на части, различающихся между собой и в чем-то однородных внутри себя. В настоящее время для решения такого рода задач широкое применение получили геоинформационные системы (ГИС). Однако стандартные средства, предлагаемые ГИС (создание тематических карт) позволяют формировать карты только по одному показателю. Поэтому пользователям приходится осуществлять «свертку» фиксируемых показателей, переходя от многомерных данных к одномерным массивам. Но выбор метода свертки требует четкого обоснования, что представляет собой нетривиальную задачу. На практике этому вопросу уделяется недостаточно внимания, а это приводит к получению карт, не отражающих реального состояния. С другой стороны, создание отдельных карт по каждому показателю и последующее их объединение, допустим методом наложения слоев, не дает ответа на вопрос, а как же разделить территорию на части именно по множеству показателей.

Для выхода из создавшегося положения и решения поставленной задачи предлагает-

ся использовать элементы теории принятия решения. Суть данного подхода заключается в сравнении отдельных частей исследуемой территории («решений», «вариантов») по предпочтению и выявлении наиболее благоприятных или опасных среди них. Сравнение осуществляется не непосредственно, а при помощи заданных на множестве решений X числовых функций $f_1, f_2, \ldots, f_m$, называемых критериями.

Для реализации данного подхода предлагается следующая методика. На первом этапе вся исследуемая территория покрывается сеткой элементарных площадных объектов (операционно-территориальные единицы – ОТЕ). В качестве ОТЕ могут быть использованы квадраты, кадастровые кварталы, земельные участки и т.п. Каждый площадной объект характеризуется набором определенных показателей, т.е. является многопризнаковым объектом:

$$\begin{array}{c|cc:c:c} Y_1 & y_{12} & y_{12} & y_{1j} & y_{1m} \\ Y_2 & y_{21} & y_{22} & y_{2j} & y_{2m} \\ \hdashline Y_t & y_{t1} & y_{t2} & y_{tj} & y_{tm} \\ \hdashline Y_n & y_{n1} & y_{n2} & y_{nj} & y_{nm} \end{array} . \qquad (1)$$

Одно многомерное наблюдение Y_t в матрице соответствует оценке m показателей в t-м пространственном объекте $x \in X$ и представляет собой m-мерный вектор-строку вида $Y_t = \{y_{t1}, y_{t2}, \ldots, y_{tj}, \ldots, y_{tm}\}$, $t = 1, 2, \ldots, n$; $j = 1, 2, \ldots, m$. Таким образом, каждое ОТЕ представляется как возможное решение (вариант, исход). На втором этапе осуществляется ранжирование объектов по множеству показателей. На третьем – производится классификация массива объектов на однородные группы и создается тематическая карта районирования.

Ранжирование ОТЕ предлагается осуществлять на основе решения задачи многокритериального выбора [1]. В этом случае математическая модель принятия решений представляется в виде $\{X, f, \succ_X\}$, где X – множество допустимых решений (исходов), f – векторный критерий вида $f = f_1, f_2, \ldots, f_m$, (здесь f_i – числовая функция, заданная на множестве X, при этом $f(\alpha)$ есть оценка исхода $\alpha \in X$ по i-му критерию $(i = 1, m)$); $\succ_X$ – отношение строгого предпочтения или предпочтения, заданное на множестве возможных решений. В терминах векторов данная задача формулируется следующим образом: $\{Y, \succ_Y\}$, где Y – множество возможных векторов $Y \subset R^m$, $\succ_Y$ – отношение предпочтения, заданное на множестве возможных векторов.

Для сформулированной модели ранжирование представляет собой процесс отыскания множества выбираемых решений $\mathrm{Sel}\, X$ (в векторном представлении отыскание множества выбираемых векторов $\mathrm{Sel}\, Y = f(\mathrm{Sel}\, X) = \{y \in Y \mid y = f(x)$ при некотором $x \in \mathrm{Sel}\, X\}$, являющиеся подмножеством критериального пространства R^m). Для любого непустого множества выбираемых решений справедливо включение $\mathrm{Sel}\, X \subset \mathrm{Ndom}\, X$, где $\mathrm{Ndom}\, X = \{x^* \in X \mid$ не существует такого $x \in X$, что $x \succ_X x^*\}$ – множество недоминируемых решений. Выполнение соотношения $x \succ_X x^*$ означает, что решение x доминирует решение x^* по отношению $\succ_X$).

Для построения множества недоминируемых решений $\mathrm{Ndom}\, X$ прежде всего выполняется перенумерация всех возможных решений. Например, $X = X_1 = \{x_1, x_2, \ldots, x_n\}$.

Первый шаг алгоритма нахождения множества недоминируемых решений есть последовательное сравнение первого решения x_1 со всеми остальными $x_2, \ldots, x_n$. Оно заключается в проверке справедливости соотношения $x_1 \succ_X x_i$ и соотношения $x_i \succ_X x_1$ при каждом $i = 2, \ldots, n$. Само сравнение выполняется покомпонентно, т. е. для всех пар решений x', $x'' \in X$, для которых имеет место неравенство $f(x') \geq f(x'')$, выполняется соотношение $x' \succ_X x''$. При этом запись $f(x') \geq f(x'')$ означает выполнение покомпонентных неравенств $f_i(x') \geq f_i(x'')$ для всех $i = 1, 2, \ldots, m$, причем $f(x') \neq f(x'')$. Или в векторном представлении вектор $y' = (y'_1, y'_2, \ldots, y'_m)$ считается предпочтительнее вектора $y'' = (y'_1, y'_2, \ldots, y'_m)$ тогда и только тогда, когда выполнено какое-либо одно из следующих условий:

$$
\begin{aligned}
&y'_1 > y''_1;\\
&y'_1 = y''_1, y'_2 > y''_2;\\
&y'_1 = y''_1, y'_2 = y''_2, y'_3 > y''_3; \qquad (2)\\
&\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\\
&m)\ y'_i = y''_i,\ i = 1, 2, \ldots, m\text{-}1;\ y'_m > y''_m.
\end{aligned}
$$

В случае истинности для некоторого i первого соотношения $x_1 \succ_X x_i$ доминируемое решение x_i следует переместить из множества X_1 в множество $X^1{}_b$ и продолжить указанную проверку для следующего за x_i решения. При выполнении второго соотношения $x_i \succ_X x_1$ перемещению подлежит первое решение x_1. Если же ни одно из двух приведенных соотношений $x_1 \succ_X x_i$ и $x_i \succ_X x_1$ не является истинным, оба сравниваемых решения переносятся в множество $X^1{}_a$. В том случае, когда сравнения решения x_1 были проведены со всеми остальными решениями $x_2, \ldots, x_n$, и ни для какого $i = 2, \ldots, n$ не оказалось выполненным соотношение $x_i \succ_X x_1$, первое решение следует запомнить как недоминируемое и переместить его в множество $X^1{}_a$.

После выполнения первого шага во множествах $X^1{}_a$ и $X^1{}_b$ соответственно хранятся возможные недоминируемые и доминируемые решения.

Второй шаг алгоритма полностью аналогичен первому. Сначала нужно перенумеровать элементы множеств $X^1{}_a$ и $X^1{}_b$. После этого следует провести последовательное сравнение первого решения множества $X^1{}_a$ и $X^1{}_b$ со всеми остальными его элементами. При этом сравнение осуществляется совершенно аналогично тому, как это было описано на первом шаге. Выполнение сравнений на втором шаге либо закончится перемещением первого решения множеств $X^1{}_a$ и $X^1{}_b$, как доминируемого в $X^2{}_a$, либо в множество и $X^2{}_b$. После выполнения некоторого конечного числа шагов в множества $X^i{}_a$ и $X^i{}_b$ будут перемещены все возможные решения и алгоритм закончит свою работу, так как оставшееся решение не с чем будет сравнивать и потому оно также будет недоминируемым, или парето-оптимальным. Множество парето-оптимальных векторов можно представить следующим образом: $P_f(Y) = \{y^* \in Y \mid$ не существует такого $y \in Y$, что $y \geq y^*\}$. Тогда в терминах векторов взаимосвязь множества выбираемых векторов и множества возможных векторов принимает вид $\mathrm{Sel}\, Y \subset \mathrm{Ndom}\, Y \subset P(Y) \subset Y$, где $\mathrm{Sel}\, Y$ – множество выбираемых векторов; $\mathrm{Ndom}\, Y$ – множество недоминируемых векторов.

Применение описанного алгоритма к произвольному конечному множеству возможных решений за конечное число шагов приводит к созданию определенного количества множеств, в которых наряду с парето-оптимальными и доминируемыми решениями будут находиться решения, которые являются парето-несравнимыми, т.е. реализуется случай несравнимости по отношению предпочтения. В связи с этим на втором этапе ранжирования привлекается дополнительная информация об относительной важности критериев для сужения области Парето. В качестве возможного решения для установления количественного выражения важности критериев предлагается использовать метод анализа иерархий [3]. В результате реализации указанного метода получают значения весовых коэффициентов для каждого критерия.

На основании количественной важности критериев формируется N-модель [2]. Под N-моделью понимается модель с $N = n_1 + \ldots + n_m$, однородными критериями, причем первые n_1 критериев получаются повторением («клонированием») первого критерия n_1 раз, следующие n_2 критериев получаются повторением первого критерия n_2 раз и т.д. При этом все первые n_1 полученные критерии считаются равноважными между собой, все следующие n_2 критерии тоже считаются равноважными и т.д. Аналогичным способом векторные оценки исходной модели превращаются в «удлиненные» векторные оценки N-модели, или N-кратные оценки, или просто N-оценки: оценка варианта по каждому из критериев K_i повторяется n_i раз. И наоборот, если в N-оценке первые n_1 компонент между собой равны, следующие n_2 компонент также равны между собой и т.д., то ей можно поставить в соответствие векторную оценку в исходной модели. Например, для двухкрите-

риальной задачи N-модель представлена $N = (3, 4)$. Векторной оценке $y = (1, 6)$ будет соответствовать N-оценка (1, 1, 1, 6, 6, 6, 6). Поскольку в N-модели полученные критерии считаются равноважными между собой, то для попарного сравнения, значения каждого вектора упорядочиваются по убыванию (например, если $y = (3, 4, 2, 3, 5)$, то $y_{\downarrow} = (5, 4, 3, 3, 2)$). Сравнение N-моделей векторов выполняется по описанному выше алгоритму (сравнение по Парето).

В тех случаях, когда количественная информация о важности критериев не позволяет упорядочить еще неупорядоченные ОТЕ, необходимо ввести дополнительную информацию. Для получения такого рода информации предлагается использовать метод целевого программирования [1]. Суть метода заключается в том, что в качестве наилучшего выбирается такой возможный вектор, который в критериальном пространстве R^m расположен ближе всех остальных допустимых векторов к некоторому идеальному вектору. При этом в качестве идеального принимается вектор, составленный из максимальных значений компонент векторного критерия. Сравнение векторов выполняется с помощью числовой функции (метрики) $\rho = \rho(y, u)$, которая каждой паре векторов y, u критериального пространства R^m сопоставляет неотрицательное число, называемое расстоянием между векторами y и u.

Оптимальным (наилучшим или наиболее удовлетворительным) объявляется такое решение $x^* \in X$, для которого выполнено равенство

$$\inf \rho\,(f(x^*), y) = \min \inf \rho\,(f(x), y), \qquad (3)$$

означающее, что оценка $f(x^*)$, соответствующая наилучшему решению x^*, должна быть расположена как можно ближе к множеству идеальных оценок.

Чаще всего при решении прикладных задач используют какую-либо метрику из следующего параметрического семейства:

$$\rho^s{}_a = (y, u) = (\Sigma a^s{}_i \,|\, u_i - y_i|^{\,s})^{1/s}, \qquad (4)$$

где $s \geq 1$ и $a^s \in \{a^s = (a^s{}_1, \ldots, a^s{}_i, \ldots, a^s{}_m)$, $a^s{}_i$ – весовые коэффициенты, учитывающие неравноценность критериев $|\Sigma a^s{}_i = 1$, $a^s{}_i > 0$ для всех $i = 1, 2, \ldots, m\}$; $u_i \geq \sup y_i$ для $i = 1, 2, \ldots, m$.

На третьем этапе стандартными средствами ГИС на основе ранжированных ОТЕ создается тематическая карта районирования. Классификация массива ОТЕ выполняется по одной из стандартных схем, предлагаемых в ГИС.

В качестве примера реализации предлагаемого подхода было проведено районирования г.Всеволожска по результатам многопризнаковой кадастровой оценки. Для оценки факторов и их сравнения был составлен ГИС-проект, в рамках которого был сфор-

а



б

Номер квартала	Фактор 1	Фактор 2	Фактор 3	Фактор 5	Фактор 6	Фактор 7
13 001 001	0,176	0,087	0,221	0,005		0,050
13 001 003	0,397	0,047	0,453	0		0,036
13 001 004	0,086	0,047	0,209	0,0097		0,002
13 001 005	0,176	0,227	0,188	0,0014		0,000
13 001 006	0,045	0,047	0,14	0		0,000
13 001 007	0,176	0,357	0,279	0,0126		0,000
13 001 008	0,176	0,207	0,248	0,009		0,000
13 001 009	0,352	0,247	0,375	0,0068		0,025
13 001 010	0,352	0,357	0,387	0		0,013
13 001 011	0	0,357	0,207	0,0163		0,015
13 001 012	0	0,031	0,03	0,0028	0,000	0,001
13 001 013	0	0,047	0	0	0,000	0,008
13 001 014	0,086	0,047	0,446	0	0,000	0,000
13 001 015	0,397	0,357	0,527	0	0,000	0,015
13 001 016	0,352	0,376	0,466	0	0,000	0,003
13 001 017	0,397	0,177	0,509	0	0,000	0,003
13 001 018	0,352	0,267	0,231	0,0097	0,000	0,025
13 001 019	0,352	0,227	0,458	0	0,000	0,018
13 001 020	0	0,047	0,079	0,0163	0,000	0,007
13 001 021	0	0,256	0,14	0	0,000	0,018
13 001 022	0,352	0,357	0,383	0	0,000	0,015
13 001 023	0,045	0,047	0,103	0	0,000	0,000
13 001 024	0	0,047	0	0	0,000	0,003
13 001 026	0,176	0,357	0,201	0,0135	0,000	0,010
13 001 027	0,352	0,267	0,401	0	0,000	0,065

Рис.1. Элементы ГИС-проекта: *а* – карта кадастрового деления г.Всеволожка; *б* – список ценообразующих признаков в каждом кадастровом квартале

мирован 261 объект (рис.1). Каждый объект представляет собой кадастровый квартал и при решении задачи рассматривался как операционно-территориальная единица.

Для построения карты районирования кадастровой стоимости был использован перечь следующих показателей: доступность населения к центру города, объектам культуры и бытового обслуживания общегородского значения; обеспеченность централизованным инженерным оборудованием и благоустройством территории, транспортная доступность к местам приложения труда; уровень развития сферы культурно-бытового обслуживания населения в пределах микрорайона, квартала, или иной планировочной единицы местного значения; историческая ценность застройки, эстетическая и ландшафтная ценность территории; состояние окружающей среды, санитарные и микроклиматические условия; инженерно-геологические условия строительства и степень подверженности территории разрушительным природным и антропогенным воздействиям; рекреационная ценность территории.

Поскольку все признаки имели неоднородные шкалы, был проведен переход к единой однородной порядковой шкале. Данный переход осуществлялся путем «разрезания» исходной шкалы на n равных интервалов, которое равно числу градаций новой шкалы. Формула определения интервалов значения факторов [2] следующая:

$$z_i = \frac{z_{\max} - z_{\min}}{n},$$

где z – интервал значения относительной ценности фактора i, соответствующий каждому значению градации новой шкалы; $z_{\min}$ – минимальное значение относительной ценности фактора i; $z_{\max}$ – максимальное значение относительной ценности фактора i; n – количество градаций в новой однородной шкале (в рамках решаемой задачи $n = 5$).

Формула присвоения каждой градации новой шкалы определенного интервала имеет вид

$$m_i \in (z_{\min} + (m-1)\, z_i;\ z_{\min} + m z_i),$$

где $m_i = 1, \ldots n$.

В результате каждому ОТЕ по каждому признаку были присвоены новые значения, равномерно изменяющиеся от 1 до 5.

В соответствии с представленной выше методикой было выполнено ранжирование ОТЕ по предпочтению. Однако наряду с парето-оптимальными и доминируемыми решениями были получены решения, которые являются несравнимыми по Парето, т.е. реализуется случай несравнимости по отношению предпочтения ($\succ$). В связи с этим на втором этапе ранжирования была привлечена дополнительная информация об относительной важности критериев (определение веса критериев) для сужения области Парето. В качестве инструмента определения весов был использован метод анализа

Матрица парных сравнений

Факторы	Доступность	Инженерное обустройство	Сфера обслуживания	Историческая ценность	Окружающая среда	Геологические условия	Рекреационная ценность	Оценка компонента	Нормализованный результат	Количественная оценка
Доступность	1	6	2	4	3	8	7	0,357	18	6
Инженерное обустройство	1/6	1	1/3	1/5	1/4	5	4	0,065	3	-
Сфера обслуживания	1/2	3	1	2	3	7	5	0,225	12	4
Историческая ценность	1/4	5	1/2	1	2	7	6	0,174	9	3
Окружающая среда	1/3	4	1/3	1/2	1	5	3	0,117	6	2
Геологические условия	1/8	1/5	1/7	1/7	1/5	1	1/3	0,023	1	-
Рекреационная ценность	1/7	1/4	1/5	1/6	1/3	3	1	0,038	2	-

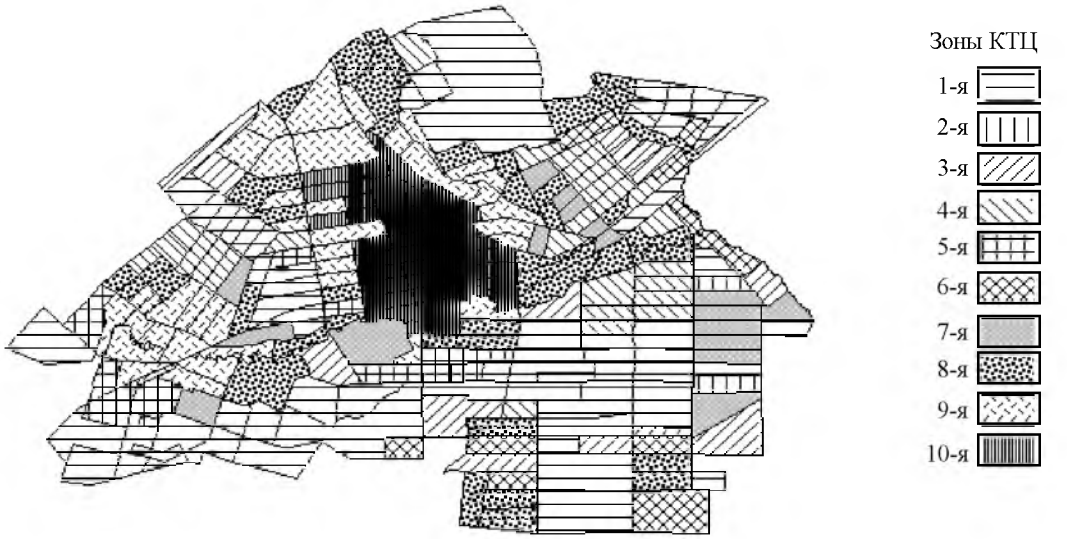


Рис.2. Карта районирования г.Всеволожска по значениям ценообразующих факторов кадастровой стоимости

иерархий (МАИ) [3]. В результате были получены весовые коэффициенты по каждому фактору (см. таблицу).

Это позволило кроме определения значений весов критерия вывести из дальнейшего рассмотрения три фактора вследствие их малых значений (нормированные значения этих факторов не превышает 10 % от суммарного нормированного результата).

Однако информации о количественном превосходстве критериев оказалось недостаточно, поскольку в перечне ОТЕ остались несравнимые по предпочтению объекты (решения). Для разрешения неопределенности был использован метод целевого программирования. В рамках данного метода для указанных ОТЕ для каждой пары векторов y, u (где u – целевой вектор, характеризующийся экстремальными значениями показателей) были рассчитаны значения эвклидова расстояния (частный случай метрик ρ семейства (4)).

Ранжированные кварталы были объединены в группы с помощью стандартного метода классификации в среде ГИС. Визуальная интерпретация образованных групп представлена на рис.2.

Представленный выше подход создания карты районирования может быть использован для создания многопризнаковых карт и другого содержания. Выполненные работы являются лишь шагом в разработке метода создания карт районирования на основе теории принятия решений в многокритериальной среде. Дальнейшие шаги развития предложенного подхода следует осуществлять в следующих направлениях: разработка программных модулей для среды геоинформационных систем, обеспечивающих полную автоматизацию построения тематических карт; обоснование количества, перечня и содержания оцениваемых показателей; разработка шкал, методов оценки и нормирования значений показателей, определяемых при решении различных задач.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Ногин В.Д.* Принятие решений в многокритериальной среде: количественный подход. 2-е изд., испр. и доп. М., 2005. 176 с.

2. *Подиновский В.В.* Введение в теорию важности критериев в многокритериальных задачах принятия решений. М., 2007. 64 с.

3. *Саати Томас Л.* Принятие решений при зависимостях и обратных связях: Аналитические сети: Пер. с англ. / Науч. ред. А.В.Андрейчиков, О.Н.Андрейчикова. М., 2008. 360 с.

REFERENCES

1. *Noghin V.D.* Decision-making in multi-criteria environment: a quantitative approach. 2 ed., corr. and add. Moscow, 2005. 176 p.

2. *Podinovskii V V.* Introduction to the importance of criteria in multicriteria-lems of decision making. Moscow, 2007. 64 p.

3. *Saaty Thomas L.* Decision Making in the dependencies and feedback: analytically network. Trans. from English / Ed. by A.V.Andreychikov, O.N.Andreichikova. Moscow, 2008. 360 p.