

УДК 519.8 (075)

**Оценка оптимального расположения логистических центров
в Республике Татарстан на основе полного статистического анализа экспертных оценок*****Шихалёв А.М.**

Кандидат экономических наук,
доцент кафедры экономико-математического моделирования
Казанского (Приволжского) федерального университета

Хоменко В.В.

Доктор экономических наук, профессор кафедры банковского дела
Казанского (Приволжского) федерального университета,
Вице-президент Академии наук РТ

**Аляутдинова Г.Р.**

Студентка кафедры автоматизированных систем обработки информации
и управления Казанского национального исследовательского
технического университета им. А.Н. Туполева – КАИ

Работа посвящена оптимальному размещению и развитию логистического комплекса на территории районов РТ в виде логистических центров как важной составной части территориального планирования республики. В качестве метода оптимизации применялся метод многокритериальных задач принятия решений. В качестве исходной информации выступали экспертные предпочтения группы экспертов по тридцати восьми критериальным показателям для восьми альтернатив – населенных пунктов республики, наиболее приемлемых с позиции предварительного содержательного анализа. Решение поставленной задачи производилось в два этапа.

На первом этапе в качестве векторов-столбцов локальных приоритетов по каждому из отобранных одиннадцати относительно независимых критериев использовались экспертные оценки с последующей верификацией их статистической состоятельности с позиции полного статистического анализа. На втором – рассчитывалась аддитивная свертка с учетом весов отобранных для расчетов критериальных показателей с получением вектора глобальных приоритетов, и на его основе – нестрогого отношения порядка на множестве отобранных для анализа альтернатив (управленческих решений).

Ключевые слова: экспертное оценивание, верификация, метод Дельфи, многокритериальная задача принятия решений, дерево целей, веса, оптимальное решение, отношения порядка.

* Исследование выполнено при финансовой поддержке РГНФ в рамках научного проекта № 15-12-16001 «Развитие финансовых механизмов управления транспортной системой крупных городов и регионов России».

Методы экспертного оценивания достаточно многообразны и находят широкое применение в практических расчетах, когда имеющаяся статистическая информация в контексте решаемой проблемы ограничена по своему объему или когда требуется верификация результатов, полученных другими способами.

Изучение возможностей оценки взаимосвязей при исследовании социально-экономических проблем является одной из главных задач статистики, имеющей свою методологическую базу. Поскольку статистика ориентирована на выявление закономерностей в массовых явлениях, ее методы так или иначе ориентированы на работу со статистическими совокупностями, которые выступают в качестве объектов исследования и которые могут быть созданы различными путями, в том числе и экспертными. В таком случае результаты исследования зависят не только от состава и числа привлеченных экспертов, но и от возможностей привлекаемого формального аппарата обработки экспертных предпочтений.

В данной работе в качестве расчетного аппарата предлагается использование результатов полного статистического анализа (ПСА) экспертных предпочтений и применение на их основе аддитивной свертки из аппарата многокритериальных задач принятия решений. Экспертной информации, полученной от независимых экспертов, лицо, принимающее решение (ЛПР – авторы статьи), в конечном итоге придает форму рабочей таблицы. Строки в рабочей таблице заполнялись исследуемыми предложениями-альтернативами в виде перечня наиболее перспективных населенных пунктов республики в шкале наименований, столбцы – условными обозначениями экспертов (также в шкале наименований), тогда как их взаимное отображение выражено баллами, выставляемыми экспертами в соответствии со своими предпочтениями в интервальной шкале Чеддока [0; 10]. С тем, чтобы эксперты не «загрубляли» свои истинные предпочтения, со стороны ЛПР допускалось выставление ими одинаковых баллов разным предложениям. Тогда объективно образуются так называемые «группы связанных рангов», операции с которыми должен предусматривать используемый формально-математический аппарат.

Приоритет каждого элемента предложений как исследуемой совокупности оценивается в соответствии с суммой набранных баллов, которая затем может быть нормирована с получением весов предложений, что и составляет суть процесса собственно решения задачи экспертного оценивания, ее первый этап. Второй этап предусматривает верификацию исходной экспертной информации в виде совокупностей баллов на предмет их статистической состоятельности по нескольким параметрам (ПСА на основе непараметрических статистик).

В данной связи термин ПСА означает всесторонний анализ содержания рабочей таблицы со сторо-

ны ЛПР по каждому критериальному показателю. По предложениям, оцененным разными экспертами, рассчитывались: коэффициенты вариации; по всем предложениям в целом – коэффициент конкордации; между парами экспертов – коэффициенты парной ранговой корреляции и коэффициенты согласованности каждого эксперта с остальными. Полученные параметры сравнивались с их пороговыми значениями и в зависимости от результатов сравнения применялся (или не применялся) метод Дельфи в виде повторного экспертного оценивания или других информационно-вычислительных процедур.

Постановка задачи, информационное обеспечение. Требуется оценить наиболее рациональное размещение логистических центров (ЛЦ) на территории следующих районов (районных центров) Республики Татарстан в соответствии с собранной статистической информацией по 38-ми ценностям (критериальным показателям, критериям).

По каждому предложению, состоящему из восьми предполагаемых мест размещения ЛЦ, в результате предварительного содержательного анализа была сформирована совокупность $A = \{a_i\}$, $i = 1, n = 8$ городов и поселков: a_1 = «Высокая гора», a_2 = «Елабуга», a_3 = «Круглое поле», a_4 = «Лаишево», a_5 = «Менделеевск», a_6 = «Свияжск», a_7 = «Столбищи», a_8 = «Чистополь» и совокупность из группы семи экспертов под именем множества $Y = \{y_j\}$, $j = 1, m = 7$. Каждый из привлеченных экспертов выразил свои предпочтения в одиннадцатибальной шкале Чеддока по каждому из 38-ми критериев, которые могут быть представлены в виде множества $X = \{x_l\}$, $l = 1, k = 38$. В результате были получены 38 экспертных матриц размером $(n \times m)$ для последующего анализа.

Однако даже на этапе постановки задачи просматривается постановка многокритериальной задачи принятия решений (МК ЗПР), если в качестве результатов экспертизы рассматривать предложения A в качестве альтернатив (вариантов управленческих решений) и X в качестве множества аддитивных (относительно независимых друг от друга) критериев [1]. Тогда постановку МК ЗПР в качестве поиска оптимальной альтернативы (и близких к ней – квазиоптимальных альтернатив) можно представить в виде следующего кортежа:

$$\langle A, x_p, x_p, \dots, x_k \rangle. \quad (1)$$

Согласно постановке задачи вида (1) – поиск оптимальной альтернативы и близких к ней можно будет осуществить по следующему алгоритму [2]:

По списку критериев:

1. Отбор среди общего списка критериев наиболее важных и относительно независимых друг от друга.

2. Структуризация множества критериев с созданием иерархической структуры вида «рыбье остова» проф. Ишикавы [3].

3. Оценка степени важности критериальных показателей (оценка весов критериев), например, при присвоении рангов критериям на уровнях «дерева» в соответствии с их для ЛПР значимостью в последствии на оценках Фишборна [4].

По списку альтернатив:

4. Получение отображения множества альтернатив A на множество критериев X в виде двумерного массива $C = \{c_{ij}\}$ в виде экспертных предпочтений в шкале Чеддока.

5. Вычисление весов альтернатив на основе экспертных оценок.

6. Проведение процесса верификации – статистической состоятельности оценок экспертов – методом непараметрических статистик (основная часть ПСА) [5].

7. Сведение взвешенных альтернатив в расчетную таблицу по каждому взвешенному критерию (из числа принятых к рассмотрению) в виде вектора-столбца локальных приоритетов (ВЛП) $U = \{u_{ij}\}$, $i = 1, 8; j = 1$, число отобранных критериев из исходных 38-ми [3].

8. Вычисление аддитивной свертки с получением вектора глобальных приоритетов (ВГП) – интегрированного, комплексного рейтинга $V = \{v_i\}$, $i = 1, n = 8$ [3]:

$$v_i = \sum_{j=1}^m u_{ij} * \varpi_j \quad (2)$$

По критериям и альтернативам:

9. Определение оптимального значения ВГП с определением номера оптимальной альтернативы и номеров квазиоптимальных альтернатив (искомых управленческих решений) из выражения в общем случае отношениями нестроного порядка:

$$v_{onm} = \max \{v_i\} \quad (3)$$

$i_{onm} = k$ – номер оптимальной альтернативы;

$x_{onm} = x_k$.

10. Интерпретация полученных результатов.

Отбор и структуризация критериальных показателей. Судя по содержанию экспертной анкеты, разработчики преследовали цели, направленные на анализ чисто технических характеристик автоперевозок при разработке оптимальной логистической схемы, таких как

1) откуда следуют в республику основные товарные потоки и куда направляются;

2) районная материальная автомобильная база и грузооборот;

3) районные характеристики дорожного хозяйства.

На взгляд авторов, среди имеющихся 38-ми критериальных показателей в первом приближении можно выделить, в соответствии с пп. 1-3, следующие основные группы – первый иерархический уровень дерева целей (ДЦ) (второй уровень иерархии приведен в качестве содержательного наполнения ветвей дерева целей первого уровня):

1 группа: «Расстояния до магистралей, вокзалов и причалов» (w_1 – вес группы): x_1 = «Расстояние до автодороги М5», км (w_{x1} – здесь и далее вес критериального показателя x_1); x_2 = «Расстояние до автодороги М7» (w_{x2}), x_3 = «Расстояние до ближайшей ж/д станции», км (w_{x3}), x_4 = «Расстояние до ближайшей речной пристани», км (w_{x4}).

2 группа: «Перевозка грузов» (w_2): x_{15} = «Наличие грузовых автомобилей организаций», шт. (w_{x15}), x_{16} = «Перевозка грузов а/транспортном», т (w_{x16}), x_{17} = «Грузооборот а/т», тыс. т-км (w_{x17}), x_{24} = «Наличие грузовых автомобилей в личном пользовании», шт. (w_{x24}).

3 группа: «Дороги» (w_3): x_{21} = «Дороги с твердым покрытием» (w_{x21}), x_{26} = «Протяженность автодорог» (w_{x26}), x_{36} = «Плотность автодорог на 1000 кв. км» (w_{x36}).

Таким образом, из предложенного списка в 38 критериев для дальнейших расчетов отобрано 11 критериев, объединенных по своему содержанию в три группы. Всего в качестве окончательных ветвей дерева целей насчитывается 11 критериев, веса которых вычисляются как произведения веса критериального показателя на соответствующей ветви ДЦ (вся совокупность весов каждой ветви представляют собой полную группу событий) на вес ветви первого уровня иерархии (вся совокупность ветвей первого уровня иерархии представляет собой также полную группу событий). Поэтому для дальнейшего удобства введем обозначение исследуемой весовой совокупности $\Omega = \{\omega_j\}$, $j = 1, 11$, значение элементов которой могут быть выражены с учетом принятых ранее обозначений следующим образом: для критериев 1 группы $\omega_1 = w_1 \cdot w_{x1}$; $\omega_2 = w_1 \cdot w_{x2}$; $\omega_3 = w_1 \cdot w_{x3}$; $\omega_4 = w_1 \cdot w_{x4}$; для критериев 2 группы $\omega_5 = w_2 \cdot w_{x15}$; $\omega_6 = w_2 \cdot w_{x16}$; $\omega_7 = w_2 \cdot w_{x17}$; $\omega_8 = w_2 \cdot w_{x24}$; для критериев 3 группы $\omega_9 = w_3 \cdot w_{x21}$; $\omega_{10} = w_3 \cdot w_{x26}$; $\omega_{11} = w_3 \cdot w_{x36}$.

Модельная оценка степени важности критериев. Оценку степени важности критериальных показателей целесообразно производить в порядковой (ранговой) шкале как более информационно устойчивой по отношению к интервальной с последующим преобразованием в интервальную шкалу (веса) по формуле Фишборна [4]. Однако на данном этапе исследования методически важным с позиции оценки чувствительности выбранного метода по отношению к степени значимости критериев будет целесообразным посчитать все группы критериев и конкретные критерии равноважными, а затем, осуществив процедуру взвешивания с учетом их относительных приоритетов в контексте поставленной проблемы, получить фактическую картину – населенные пункты РТ на предмет перспективного расположения будущих ЛЦ.

Если принять критерии равноважными, то вес ветвей дерева первого уровня иерархии (вес сформиро-

ванных групп) будет: $w_1 = w_2 = w_3 = w = 1/3 = 0,333$; вес ветвей второго иерархического уровня 1-й группы: $w_{r1} = w_{r2} = w_{r3} = w_{r4} = w_r = 1/4 = 0,250$; вес ветвей второго иерархического уровня 2-й группы $w_{r5} = w_{r6} = w_{r7} = w_{r8} = w_r = 1/4 = 0,250$; вес ветвей второго иерархического уровня 3-й группы $w_{r9} = w_{r10} = w_{r11} = w = 1/3 = 0,333$. Тогда веса критериальных показателей $\Omega = \{\omega_j\}, j = 1, 11$ могут быть вычислены, согласно изложенному выше правилу, как произведение весов соответствующей группы на вес критериального показателя, входящего в группу: $\omega_1 = 0,0832$; $\omega_2 = 0,0832$; $\omega_3 = 0,0832$; $\omega_4 = 0,0832$; $\omega_5 = 0,0832$; $\omega_6 = 0,0832$; $\omega_7 = 0,0832$; $\omega_8 = 0,0832$; $\omega_9 = 0,1109$; $\omega_{10} = 0,1109$; $\omega_{11} = 0,1109$.

Расстановка экспертных предпочтений. Эксперты, работая независимо друг от друга, на основе предварительной региональной информации по каждому из отобранных 11-ти критериев оценивают субъективно значимость той или иной альтернативы в шкале $[0; 10]$ с учетом количественных статистических характеристик, приводимых в макетах экспертных анкет. Чем существенней значение той или иной альтернативы из множества $A \{a_i\}, i = 1, n = 8$ по тому или иному критериальному показателю (с 1-го по 11-й), тем выше балл. С тем, чтобы эксперты не «загрубляли» свои предпочтения в оценке степени важности альтернатив по каждому критерию, со стороны ЛПР допускалось выставление одних и тех же баллов разным альтернативам. В результате по каждому критерию была получена матрица экспертных оценок размером (8×7) : $C = \{c_{ij}\}, i = 1, n = 8$ – число предварительно отобранных предложений-альтернатив в виде наименований перспективных для размещения ЛЦ населенных пунктов РТ; $j = 1, m = 7$ – число привлеченных экспертов.

Вычисление ВЛП-весов альтернатив на основе экспертных оценок. Методику вычисления весов предложений (альтернатив) подробно рассмо-

трим на примере экспертных оценок по критериальному показателю x_1 = «Расстояние до автодороги М5». Исходные предложения (будущие альтернативы в терминах МК ЗПР) и оценки независимых экспертов представлены в таблице 1 (графы 1-9). Таким образом ЛПР сформирован массив $C = \{c_{ij}\}, i = 1, n = 8; j = 1, m = 7$ (здесь и далее расчеты произведены средствами авторского компьютерного комплекса в среде FoxPro 2.5). В результате по выражению (4) формируется вектор-столбец u_{ij} для искомого ВЛП $U = \{u_{ij}\}, i = 1, 8; j = 1, 11$ – по числу принимаемых к рассмотрению предварительно отобранных критериев из 38-ми исходных. Следовательно, ЛПР для формирования вектора локальных приоритетов U должен получить 11 таблиц, подобных таблице 1.

Из содержания графы 10 таблицы 1 следует, что, с точки зрения близости альтернатив к федеральной трассе М5, перспективность рассматриваемых населенных пунктов РТ можно оценить в рамках приводимого нестрогого отношения порядка следующего вида (здесь символ « $>$ » означает «не хуже»):

Круглое поле $>$ Елабуга $>$ Менделеевск $>$ Свияжск $>$ Лаишево = Столбище $>$ Чистополь $>$ Высокая гора.

Веса предложений (здесь – вектор-столбец локальных приоритетов) определяются путем нормирования сумм оценок экспертов по каждой альтернативе (по каждой строке):

$$S_{ui} = \sum_{j=1}^n C_{ij}$$

Затем все суммы в строках в свою очередь суммируются:

$$S_{st} = \sum_{i=1}^m S_{ui}$$

Тогда вес каждой альтернативы в качестве элемента ВЛП можно оценить как отношение (графа 10 таблицы 1):

Таблица 1

Оценки экспертов по критерию x_1 = «Расстояние до автодороги М5», баллы/ранги (места в графах)

i	Предложения (альтернативы)	Эксперты и экспертные оценки $C = \{c_{ij}\}$ / ранги							Вес, u_i / место
		y_1	y_2	y_3	y_4	y_5	y_6	y_7	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	Высокая гора	3/8	2/5,5	3/7,5	2/5,5	6/7,5	0/8	3/8	0,0850/7
2	Елабуга	6,3/2	3/2	4/2	2/5,5	8/2,5	8,4/3	4,5/2	0,1606/2
3	Круглое поле	7/1	5/1	4/2	3/1,5	9/1	10/1	5/1	0,1924/1
4	Лаишево	3,5/7	2/5,5	3/7,5	2/5,5	7/5	3,1/5,5	4/4,5	0,1101/5
5	Менделеевск	4,2/6	2/5,5	3/7,5	2/5,5	6/7,5	1,9/7	3,7/7	0,1244/3
6	Свияжск	5/4	2/5,5	3/7,5	3/1,5	7/5	3,4/4	4/4,5	0,1226/4
7	Столбище	4,7/5	2/5,5	3/7,5	2/5,5	7/5	3,1/5,5	4/4,5	0,1101/5
8	Чистополь	6/3	2/5,5	4/2	2/5,5	8/2,5	9,4/2	4/4,5	0,0895/6
$TW_j =$		0	210	144	216	36	6	60	
Сумма весов =									1,0000

$$u_i = \frac{S_{ii}}{S_{st}}.$$

При этом должно выполняться требование

$$\sum_{i=1}^m u_i = 1,00 \quad (4)$$

Таким образом, путем простого подсчета и нормирования приоритеты среди альтернатив a_{il} , $i = 1, 8$ по первому критерию x_j = «Расстояние до автомагистрали М5» из 1 группы критериев найдены.

Проведение процесса верификации оценок экспертов. Данный процесс со стороны ЛПР (авторов статьи) преследует цель многосторонней оценки статистической состоятельности предпочтений независимых экспертов.

Итак, на первом этапе верифицируются предпочтения экспертов по каждой альтернативе a_{il} на предмет приемлемости или неприемлемости для ЛПР степени их разбросанности от средних оценок по строкам таблицы 1 – рассчитываются коэффициенты вариации h_i (по числу строк) и сравниваются с граничным показателем 0,30 (в отдельных источниках 0,33) [5]. Если коэффициент вариации не превосходит граничного значения, вариабельность считается умеренной, в противном случае – повышенной:

$$h_i = \frac{\sigma_i}{c_i^{cp}}, \quad (5)$$

где σ_i – среднее квадратическое отклонение (с.к.о.) оценок экспертов C_{ij} по каждому i -ой альтернативе; вычисляется как корень квадратный от дисперсии D_i по тем же оценкам; c_i^{cp} – простое среднее механическое значение оценок экспертов по i -ой альтернативе:

$$c_i^{cp} = \frac{1}{n} * \sum_{j=1}^n c_{ij},$$

$$\sigma_i = \sqrt{D_i},$$

$$D_i = \frac{1}{n-1} * (c_{ij} - c_i^{cp})^2.$$

Сделав расчеты по выражению (5) с использованием данных таблицы 1, получаем явно завышенные коэффициенты вариации оценок экспертов по каждому предложению. Однако подобная ситуация может быть несущественной (не столь важно, какими пределами шкалы Чеддока пользовались эксперты, сколько создаваемая при этом относительная ранговая картина) при высоком значении коэффициента конкордации (согласованности предпочтений экспертов по всем предложениям сразу). Если вычисленный коэффициент конкордации $W = [0; 1]$, рассчитанного по выражению (6), превышает граничное значение 0,50, общая статистическая согласованность предпочтений экспертов считается приемлемой.

Согласно выражению (6), коэффициент конкордации W есть не что иное, как вариация сумм рангов по каждому предложению, соотношенная с соответ-

ствующими степенями свободы (дисперсия относительно сумм рангов) с учетом поправок на группы связанных рангов для каждого участвующего в экспертизе специалиста.

$$W = \frac{12 * \sum_{i=1}^m (S_i - S_{cp})^2}{n^2 * (m^3 - m) - n * \sum_{j=1}^n TW_j}, \quad (6)$$

Для вычисления по выражению (6) необходимо предварительно проранжировать оценки экспертов по известным правилам, то есть осуществить преобразование оценок экспертов из интервальной шкалы C в ранговую S , согласно выражению (7)

$$\tau : C \rightarrow S \quad (7)$$

Действие отображения (7) можно наглядно продемонстрировать, например, на экспертных оценках графы 7 таблицы 1 (для эксперта с условным номером $j = 5$). Первое место ($s_{35} = 1$) в общей совокупности предпочтений эксперта занимает предпочтение, выраженное баллом $9 = c_{35}$; второе и третье места ($2 + 3 = 5$ мест) занимают две «восьмерки» $c_{25} = 8$ и $c_{85} = 8$. Следовательно, на каждую из них приходится поровну из суммарного числа занимаемых ими мест, то есть по $5/2 = 2,5$ ранга (места). Иначе говоря, $s_{25} = 2,5$ и $s_{85} = 2,5$. Тогда на три «семерки» приходится 3, 4 и 5 места; в сумме мест и на каждую «семерку приходится поровну по $15/3 = 5$ рангов (мест): $s_{45} = 5$; $s_{65} = 5$; $s_{75} = 5$. Оставшиеся 7-е и 8-е места остаются на долю двух «шестерок» – $c_{15} = 6$ и $c_{55} = 6$. Тогда из восьми ранжируемых альтернатив они получают $7 + 8 = 15$ рангов (мест), что на каждую «шестерку» будет приходиться по $15/2 = 7,5$ мест (рангов): $s_{15} = 7,5$ и $s_{55} = 7,5$. Ранжирование предпочтений эксперта $j = 5$ как построение отображения вида (7) завершено.

Тогда S_i – это сумма рангов оценок (предпочтений экспертов) по каждому предложению (по строкам табл. 1), а S_{cp} – это среднее значение, предварительно вычисленное из « m » S_i как слагаемых, что и показано в выражениях (8) и (9) – соответственно:

$$Si = \sum_{j=1}^n S_{ij}, \quad (8)$$

$$S_{cp} = \frac{1}{m} * \sum_{i=1}^m S_i. \quad (9)$$

Далее, перед расчетом W по формуле (6) необходимо определить поправки на связанные ранги TW_j для оценок каждого эксперта. В таблице 1 приведены рассчитанные по выражению (10) TW_j – для вычисления коэффициента конкордации; T_j – для вычисления коэффициента парной ранговой корреляции ρ_{jk} (в таблице 1 не приводятся):

$$TW_j = \sum_{v=1}^{lv} (t_v - t_{jv})^2 \quad (10)$$

В формуле (10) lv – число групп связанных рангов в ранжируемой совокупности; v – текущая перемен-

ная; t_{jv} – число одинаковых значений в группе, что можно проиллюстрировать на предпочтениях того же эксперта с номером $j = 5$ (графа 7 таблицы 1), в которых проявляются две группы связанных рангов (одинаковых степенях предпочтения эксперта по разным из восьми предложенных к оцениванию предложений-альтернатив. Для определения величины поправок на связанные ранги выражение (10) для двух «восьмерок» – первой группы связанных рангов ($t_{51} = 2$), трех «семерок» – второй группы связанных рангов ($t_{52} = 3$) и двух «шестерок» ($t_{523} = 2$) – третьей группы связанных рангов примет вид:

$$TW_5 = \sum_{v=1}^{jv=3} (t_{jv}^3 - t_{jv}) = (2^3 - 2)_8 + (3^3 - 3)_7 + (2^3 - 2)_6 = (8 - 2) + (27 - 3) + (8 - 2) = 36.$$

Нетрудно заметить, что формула (10) также пригодна и для расчета поправок на связанные ранги, и для уникальных оценок эксперта: например, для пятого эксперта в таблице 1 балл 9 встречается лишь один раз – при оценке альтернативы с номером $i = 3$. Тогда величина поправки на эту одноэлементную группу составит $(1^3 - 1)_{\text{для } 9} = 0$, что придает выражению (10) известную общность для расчета групп связанных рангов в целом.

Тогда поправка на связанные ранги для вычисления коэффициента парной ранговой корреляции между парами экспертов (следующий этап верификации) может быть определена следующим образом:

$$T_j = \frac{TW_j}{12}, \quad (11)$$

С учетом выражения (7) – (9) расчеты по формуле (6) дали результат $W = 0,568$, что превосходит граничное значение 0,5. Следовательно, по всем предложениям оценки экспертов могут считаться статистически состоятельными.

На третьем этапе верификации в рамках ПСА рассчитываются коэффициенты парной ранговой корреляции для каждой пары экспертов; всего необходимо произвести вычислений для $z = m \cdot (m - 1) / 2 = 7 \cdot (7 - 1) / 2 = 21$ пар экспертов – по всему декартову множеству ($m \times m$) по правилу «каждый с каждым»):

$$P_{ik} = \frac{\frac{m}{6} \cdot (m^2 - 1) - (T_j + T_k) - \sum (S_{ij} - S_{ik})^2}{\left(\left(\frac{m}{6} \cdot (m^2 - 1) - 2 \cdot T_j \right) \cdot \left(\frac{m}{6} \cdot (m^2 - 1) - 2 \cdot T_k \right) \right)^{1/2}}, \quad (12)$$

В формуле (12) поправки на связанные группы рангов вычисляются по выражению (10) и (11). Обычно для ручного расчета суммы в числителе выражения (12) $\sum (S_{ij} - S_{ik})^2$ для удобства составляют дополнительную рабочую таблицу. Все вычисленные коэффициенты ρ_{jk} сравниваются с граничным значением, равным 0. Если $\rho_{jk} > 0$, статистические противоречия в предпочтениях экспертов отсутствуют; в противном случае ЛПР либо рекомендует

паре экспертов с условными номерами j и k необходимость уточнения своих предпочтений при проведении повторной экспертизы (метод Дельф), либо исключает одного из экспертов из повторных расчетов путем внесения соответствующих программных пометок в авторский компьютерный модуль.

Как показывают машинные расчеты, из 21-й пары экспертов лишь $\rho_{25} = -0,032 < 0$ (противоречия практически не выражены). Остальные 20 пар экспертов имеют положительные коэффициенты парной ранговой корреляции.

На завершающем этапе верификации рассчитываются коэффициенты согласованности каждого эксперта с остальными по формуле:

$$v_j = \frac{1}{n-1} \sum_{j=1(j \neq k)}^n p_{jk}, \quad (13)$$

Формула (13) означает обычное (механическое, невзвешенное среднее арифметическое) из коэффициентов корреляции по строкам корреляционной матрицы без учета единичных диагональных элементов (корреляционные отношения по определению рефлексивны).

Всего таких коэффициентов – по числу экспертов; все они сравниваются с пороговым значением 0,50. Если $v_j > 0,50$, то согласованность эксперта с остальными считается достаточной. В расчетах только для экспертов с условными номерами $j = 2$ и $j = 3$ коэффициенты согласованности с остальными равны 0,243 и 0,427 – соответственно. У остальных подобные коэффициенты превышают пороговое значение 0,5 (согласованность с остальными экспертами достаточная).

На данном этапе верификацию предпочтений экспертов методом ПСА следует считать завершённой.

Далее, в качестве «метода Дельф» ЛПР использовал возможность временного исключения эксперта с номером $j = 2$ из расчетов. При повторном решении и последующей верификации в полном объеме отрицательных корреляций (конфликтов экспертов) не выявлено: все коэффициенты парной ранговой корреляции были строго больше нуля; значение W составило 0,663; коэффициенты по выражению (13) все превысили пороговое значение 0,5. Повторный расчет весов и приоритетов среди альтернатив по выражению (4) показал, что веса предложений несколько изменились (в пределах долей процентов), также изменились и их приоритеты, что можно записать следующим образом.

В итоге по критерию x_j : Круглое поле (вес 0,1895/1 место), Елабуга (0,1641/2), Свияжск (0,1267/3), Столбищи (0,1187/4), Лаишево (0,1127/5), Менделеевск (0,1037/6), Чистополь (0,0998/7), Высокая гора (0,0848/8). Эти результаты, в отличие от результатов графы 10 таблицы 1, внесены в соответствующий столбец вектора локальных приоритетов таблицы 2 и будут приняты для дальнейших расчетов.

Таблица 2

**Вектор локальных приоритетов $U = \{u_{ij}\}$
для альтернатив по множеству равноважных критериев**

i	Предложения	Условные обозначения критериев и их веса											
		x_{1i} 0,083	x_{2i} 0,083	x_{3i} 0,083	x_{4i} 0,083	x_{15i} 0,083	x_{16i} 0,083	x_{17i} 0,083	x_{24i} 0,083	x_{21i} 0,111	x_{26i} 0,111	x_{36i} 0,111	v_i %
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1	Высокая Гора	0,08	0,15	0,17	0,17	0,09	0,11	0,11	0,15	0,17	0,14	0,13	13,6
2	Елабуга	0,16	0,15	0,13	0,06	0,21	0,15	0,14	0,11	0,15	0,13	0,14	14,0
3	Круглое поле	0,19	0,13	0,15	0,07	0,13	0,18	0,09	0,17	0,06	0,13	0,12	12,8
4	Лаишево	0,11	0,09	0,09	0,12	0,11	0,10	0,15	0,15	0,15	0,13	0,11	12,0
5	Менделеевск	0,10	0,13	0,13	0,06	0,04	0,04	0,06	0,11	0,14	0,05	0,11	9,0
6	Свияжск	0,13	0,14	0,14	0,13	0,19	0,15	0,19	0,07	0,11	0,18	0,21	15,1
7	Столбищи	0,11	0,11	0,13	0,18	0,11	0,09	0,15	0,15	0,15	0,11	0,09	12,2
8	Чистополь	0,10	0,08	0,05	0,19	0,11	0,16	0,10	0,09	0,13	0,12	0,08	10,9

Подобным образом рассчитываются ВЛП по оставшимся десяти критериям. Результаты решения МК ЗПР с целью поиска оптимальной альтернативы с построением отношения нестрогого порядка сведены в таблице 2.

В таблице 2 3-я графа есть ранее прокомментированная 10-я графа из таблицы 1. Оставшиеся графы 4-13 таблицы 2 также были заполнены значениями, рассчитанными по формуле (4) после того, как средствами авторской компьютерной программы были реализованы процедуры верификации по выражениям (5), (6), (12) и (13) и установлена статистическая состоятельность независимых экспертных предпочтений, выраженных в баллах.

Также установлено, что в результате ПСА для критериев 1-го блока x_2, x_3, x_4 : W не ниже 0,8; ρ_{jk} не ниже +0,7; v_j не ниже 0,6). Также для критериев 2-го блока $x_{15}, x_{16}, x_{17}, x_{24}$: $W \geq 0,8$; $\rho_{jk} \geq +0,8$; $v_j \geq 0,7$. Для критериев 3-го блока x_{21} и x_{26} : $W \geq 0,7$; $\rho_{jk} \geq +0,4$; $v_j \geq 0,5$. Однако при расчете значения вектора локальных приоритетов для критерия x_{36} результаты верификации оказались следующими: $W = 0,399$ – менее порогового значения 0,5; несколько коэффициентов парной ранговой корреляции между парами экспертов ρ_{jk} имели отрицательные значения; для двух экспертов коэффициент согласованности их с остальными v_j был также не только меньше необходимого порогового значения 0,5, но и ниже нуля. После очередной реализации метода Дельф (выведения из дальнейших расчетов экспертов с условными номерами $j = 3$ и $j = 5$) повторная верификация показала значение $W \geq 0,894$; $\rho_{jk} \geq +0,7$ и $v_j \geq 0,8$, после чего в графу 13 таблицы 2 были занесены окончательные значения вектора локальных приоритетов. Также по формуле (4) были уточнены значения для графы 9 таблицы 2.

Заполненная таким образом таблица 2 может быть использована для получения вектора глобальных приоритетов, рассчитанных по формуле (2). Результаты сведены в графу 14 таблицы 2.

Определение оптимального значения ВГП.

Оптимальное значение вектора глобальных приоритетов осуществляется в соответствии с выражениями, объединенными под номером (3):

$$v_{onm} = \max\{v_i\} = \max\{13,6; 14,0; 12,8; 11,9; 9,0; 15,1; 12,2; 10,9\} = 15,1, (14)$$

$i_{onm} = k = 6$ – номер оптимальной альтернативы;

$x_{onm} = x_k = x_6$ – «Свияжск».

Однако практический интерес может представлять не только одна (оптимальная) альтернатива, если альтернативы в соответствии с результатами (14) представить в виде отношений порядка с использованием знака «>» – «не хуже (лучше)»:

$$\begin{aligned} & \text{Свияжск (15,1)} > \text{Елабуга (14,0)} > \\ & > \text{Высокая гора (13,6)} > \text{Круглое поле (12,8)} > (15) \\ & > \text{Столбищи (12,2)} > \text{Лаишево (12,0)} > \\ & > \text{Чистополь (10,9)} > \text{Менделеевск (9,0)}. \end{aligned}$$

Таким образом, при равноважных критериях среди сформированных блоков критериев (первый уровень иерархии) и внутри блоков критериев (второй уровень иерархии) в результате решения МК ЗПР на основе экспертной информации отношения предпочтения приведены в отношении порядка (15). Однако практический интерес представляет выражение, подобное (15) при весах критериальных показателей, наиболее приближенных к реальным ценностям, которые вряд следует ожидать равноважными.

Процедура взвешивания критериев. Содержание процедуры взвешивания можно условно разделить на содержательный (неформализованный) и формализованный этапы.

Как уже отмечалось, предпочтения со стороны авторов статьи (ЛПР) удобнее формализовать в ранговой (порядковой) шкале. В таком случае предпочтение среди блоков первого уровня следует отдать блоку 1 (1-е место), так как в него сведены критериальные показатели, характеризующие географическое положение главных грузовых и пассажирских терминалов РТ: расположения речных портов и ж/д станций, а также расстояний до федеральных маги-

стралей М5 и М7. Второе место, видимо, следует отдать 2-му блоку (техническое обеспечение перевозок грузов автотранспортом), после чего третье место остается третьему блоку (характеристики автомобильных дорог), занимающему явно подчиненное положение по отношению к предыдущему ценностному блоку.

Тогда с помощью известной формулы отображения рангов в интервальную шкалу с учетом конкретных мест (обозначим текущее место через символ « k ») в выражении (16) соответствующие им веса можно получить по формуле (16) [4]:

$$w_j = \frac{2 * (m - k + 1)}{m * (m + 1)}, \quad (16)$$

где w_j – искомые веса блоков (групп) критериев; m – число ветвей ДЦ первого уровня (здесь $m = 3$). По формуле (16) получим: $w_1 = 0,50$; $w_2 = 0,33$; $w_3 = 0,17$.

На ветвях ДЦ второго уровня в 1-й группе ранговые предпочтения, в соответствии с перспективным планом развития транспортной сети РТ, целесообразно распределить следующим образом: «Расстояние до ближайшей речной пристани» – 1 место вследствие того, что речные грузопотоки по отношению к остальным наиболее рентабельны (на географической широте РТ длительность навигационного сезона достигает 7-8 месяцев в году), «Расстояние до ближайшей ж/д станций» – 2 место, тогда как «Расстояние до трассы М5» и «Расстояние до трассы М7» – 3 место, так как трудно отдать предпочтение одной из них: обе из них проходят по территории Республики Татарстан. В этой связи – в случае связанных (похожих) рангов, – следует воспользоваться модифицированной формулой (16). В итоге веса между критериями второго уровня 1-го блока распределяются следующим образом: $w_{x4} = 0,3636$; $w_{x3} = 0,2727$; $w_{x1} = w_{x2} = 0,1818$ (сумма весов $= 0,9999 \approx 1$).

На ветвях ДЦ второго уровня во 2-й группе ранговые предпочтения целесообразно распределить

следующим образом: «Грузооборот а/т», тыс. т-км – 1 место, «Перевозка грузов а/транспорт», т – 2 место, «Наличие грузовых автомобилей организаций», шт. – 3 место, «Наличие грузовых автомобилей в личном пользовании», шт. – 4 место. В итоге по формуле (16) веса между критериями второго уровня 2-го блока распределяются следующим образом: $w_{x17} = 0,4$; $w_{x16} = 0,3$; $w_{x15} = 0,2$; $w_{x24} = 0,1$ (сумма весов $= 1$).

На ветвях ДЦ второго уровня в 3-й группе ранговые предпочтения целесообразно распределить следующим образом: «Плотность автодорог на 1000 кв. км» – 1 место, «Дороги с твердым покрытием» – 2 место, «Протяженность автодорог» – 3 место. По формуле (16) веса между критериями второго уровня 3-го блока распределяются следующим образом: $w_{x36} = 0,50$; $w_{x26} = 0,33$; $w_{x21} = 0,17$ (сумма весов $= 1$).

Тогда веса критериальных показателей $\Omega = \{\omega_j\}$, $j = 1, 11$ могут быть вычислены как произведение весов соответствующей группы на вес критериального показателя, входящего в группу: $\omega_1 = 0,0909$; $\omega_2 = 0,0909$; $\omega_3 = 0,1364$; $\omega_4 = 0,1818$; $\omega_5 = 0,0660$; $\omega_6 = 0,0990$; $\omega_7 = 0,1320$; $\omega_8 = 0,0330$; $\omega_9 = 0,0561$; $\omega_{10} = 0,0289$; $\omega_{11} = 0,0850$.

Согласно содержанию графы 14 таблицы 3 оптимальное значение вектора глобальных приоритетов принадлежит Свияжску, при этом отношение предпочтения строгого порядка в отличие от выражения (15) примет вид (17); в скобках указаны веса в % для взвешенного варианта и для равноважного.

$$\begin{aligned} & \text{Свияжск (15,2, был 15,1)} > \\ & > \text{Высокая гора (13,6, был 13,8)} > \\ & > \text{Столбищи (13,5, был 12,2)} > \\ & > \text{Елабуга (13,3, был 14,0)} > \\ & > \text{Круглое поле (12,6, был 12,8)} > \quad (17) \\ & > \text{Чистополь (11,6, был 10,9)} > \\ & > \text{Лаишево (11,6, был 12,0)} > \\ & > \text{Менделеевск (8,6, был 9,0)}. \end{aligned}$$

Как следует из сравнения равноважного сценария (15) и неравноважного сценария (17), объективно оп-

Таблица 3

**Вектор локальных приоритетов $U = \{u_{ij}\}$
для альтернатив по множеству неравноважных критериев**

i	Предложения	Условные обозначения критериев и их веса											v_p %
		$x_{1'}$ 0,091	$x_{2'}$ 0,091	$x_{3'}$ 0,136	$x_{4'}$ 0,182	$x_{15'}$ 0,066	$x_{16'}$ 0,099	$x_{17'}$ 0,132	$x_{24'}$ 0,033	$x_{21'}$ 0,056	$x_{26'}$ 0,029	$x_{36'}$ 0,085	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1	Высокая Гора	0,09	0,16	0,17	0,17	0,09	0,11	0,11	0,15	0,17	0,14	0,13	13,8
2	Елабуга	0,16	0,15	0,13	0,06	0,21	0,15	0,14	0,11	0,15	0,13	0,14	13,3
3	Круглое поле	0,19	0,13	0,15	0,07	0,13	0,18	0,09	0,17	0,06	0,13	0,12	12,6
4	Лаишево	0,11	0,09	0,09	0,12	0,11	0,10	0,15	0,15	0,15	0,13	0,11	11,6
5	Менделеевск	0,10	0,13	0,13	0,06	0,04	0,04	0,06	0,11	0,14	0,05	0,11	8,6
6	Свияжск	0,13	0,14	0,14	0,13	0,19	0,15	0,19	0,07	0,11	0,18	0,21	15,2
7	Столбищи	0,12	0,12	0,13	0,18	0,11	0,09	0,15	0,15	0,15	0,11	0,09	13,5
8	Чистополь	0,10	0,08	0,05	0,19	0,11	0,16	0,10	0,09	0,13	0,12	0,08	11,6

тимальным на предмет расположения логистического центра остается Свияжск; Елабуга переместилась со второго места на четвертое; Лаишево поменялось местами с Чистополем; Менделеевск сохранил свое восьмое место. Следовательно, предложенный алгоритм решения задачи оптимального выбора является достаточно чувствительным к весовым характеристикам рассматриваемых критериев.

Обсуждение результатов. Поскольку список альтернатив считается заданным заранее, при оценке степени важности каждого сформированного блока следует ориентироваться на сведения, приведенные в [6, с. 169], где согласно «Схеме территориального планирования Республики Татарстан» определены главные мероприятия по развитию республиканского логистического комплекса, который предусматривает размещение пяти проектных логистических центров на территории районов РТ: 1) Свияжский межрегиональный мультимодальный логистический центр; 2) Центр логистики в составе СЭЗ Алабуга; 3) Лаишевский региональный транспортно-логистический центр; 4) Центр логистики вблизи г. Чистополя; 5) Центр логистики вблизи г. Менделеевска. При этом нетрудно заметить, что во-первых, акцент органами государственного управления (ОГУ) РТ при планировании размещения ЛЦ сделан с учетом имеющихся речных путей сообщения по р. Волга, р. Кама и водохранилища, поскольку речной транспорт по отношению к иным видам транспорта является, как уже отмечалось, при прочих равных условиях менее затратным.

То, что такие перспективные места расположения будущих логистических центров в отношении речного транспорта, как Лаишево, Чистополь и Менделеевск оказались не на лидирующих местах, свидетельствует прежде всего о том, что моделирование оптимального (квазиоптимального) размещения логистических центров в Республике Татарстан нуждается в дополнительных разъяснениях. Тем более, что предложенное здесь решение МК ЗПР по выявлению наиболее перспективных мест расположения ЛЦ из списка предложенных населенных пунктов (альтернативы x_i - x_8) базируется на имеющейся статистике, тогда как планируемое размещение перспективных ЛЦ со стороны ОГУ, видимо, сопровождалось соответствующими краткосрочными и среднесрочными прогнозными показателями, которыми авторы статьи не располагали.

Вместе с тем отобранные в данной статье к рассмотрению в МК ЗПР критериальные показатели характеризуют именно степень близости терминалов к основным трассам (близость от речных портов является лишь одним из показателей), обеспечение автотранспортом и характеристики дорожной структуры в целом ориентированы на автомобильные транспортные потоки. Тогда отношения порядка вида (17) следует считать результатом проделанной

работы. С позиций рассматриваемых взвешенных критериев, наиболее перспективными в отношении товарного обмена на базе автомобильного транспорта пять из рассматриваемых восьми альтернативных населенных пунктов Республики Татарстан являются (в порядке убывания по приоритету): Свияжск, Высокая гора, Столбищи, Елабуга, Круглое поле. Тогда как менее предпочтительными в отношении показателей автотранспорта выглядят Чистополь, Лаишево и Менделеевск.

Однако расширение имеющегося списка критериальных показателей дополнительными показателями (экономическими, демографическими, социальными, географическими и другими), характеризующими не только достигнутые, но и перспективные позиции, по предложенной методике решения МК ЗПР по выбору оптимального расположения логистических терминалов в республике позволит провести уточненные расчеты с последующей выработкой практических рекомендаций органам государственного управления.

Литература:

1. Борисов А.Н., Крумберг О.А., Федеров И.П. Принятие решений на основе нечетких моделей: Примеры использования. – Рига: Зинатне, 1990. – 184 с.
2. Шихалев А.М., Кашбразиев Р.В. Математическое моделирование межрегиональной кооперации (по материалам РТ) // Проблемы анализа и моделирования региональных социально-экономических процессов: Материалы III Всероссийской научно-практической конференции / Под ред. И.И. Исмагилова. Казань, 17-18 мая 2012 г. – Казань: Отечество, 2012. – С. 55-59.
3. Рейтинг относительной кредитоспособности субъектов РФ. – М.: Рейтинговый центр АО «АК&М», 2001.
4. Мартыщенко Л.А. и др. Военно-научные исследования и разработка вооружения и техники. Ч. 1. – М.: МО РФ, 1993. – 302 с.
5. Громыко Г.Л. Общая теория статистики: Практикум. – М.: ИНФРА-М, 1999. – 139 с.
6. Рожко О.Н., Хоменко В.В., Макарова Е.В. Инновации в управлении транспортными логистическими системами: монография / Под общ. ред. О.Н. Рожко. – Казань: Изд-во «Бриг», 2015. – 187 с.

Evaluation of Optimal Location of Logistics Centres in the Republic of Tatarstan on the Basis of Detailed Statistical Analysis of Expert Estimations

A.M. Shikhalev
Kazan (Volga Region) Federal University

V.V. Khomenko
Academy of Sciences of the Republic of Tatarstan

G.R. Alyautdinova
Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev

The paper is dedicated to the optimal placement and development of logistics complex on the territory of the Republic of Tatarstan in the form of logistics centres as an important part of territorial planning of the Republic. As optimization method we used the multicriteria problems of decision-making.

The preferences of expert groups on thirty-eight criteria-based indicators for the eight alternatives – settlements of the Republic, the most acceptable from the position of the preliminary content analysis, were chosen as a source of information. The stated aim was achieved in two stages.

At the first stage expert estimates with further verification of their statistical consistency were used as column vectors of local priorities on each of eleven selected independent criteria. The second stage included calculating the additive convolution with account of proportion of the selected criteria indicators to obtain the vector of global priorities and on its basis non-strict order relations on multitude of the selected alternatives (management decisions).

Key words: expert evaluation, verification, Delphi technique, multi-criteria decision-making problem, objective tree, weight, optimal solution, order relations.

