

# Метод структурного анализа многоуровневых транспортных систем



**И. А. Тарарычкин,**  
доктор технических наук, профессор кафедры «Транспортные системы» Луганского университета им. В. Даля

**Перспективы экономического развития территорий и отдельных промышленных зон тесно связаны с наличием и эффективностью функционирования логистических транспортных систем. В статье разработан метод структурного анализа транспортной системы, основу которого составляет предварительное разделение множества составных элементов на отдельные подмножества, принадлежащие местному региональному и межрегиональному уровням.**

Особенности логистических транспортных систем определяются, с одной стороны, их целевым назначением и сложной сетевой структурой, а с другой – характеристиками существующих грузовых потоков.

При этом в отсутствие надежных методов анализа структуры многоуровневых транспортных систем затруднено решение задач, связанных с оптимизацией и рационализацией их функционирования. Целесообразность такого структурного анализа с практическим применением его результатов местными и региональными органами власти определяется необходимостью принятия обоснованных управленческих решений по перспективному развитию транспортных систем, совершенствованию их инфраструктуры и обеспечению современного уровня логистического сервиса [1, 2].

На местном уровне перевозки между действующими предприятиями, работающими во взаимодействии, свя-

заны с доставкой сырья, материалов, готовой продукции. Подобная кооперация приводит к образованию производственных кластеров, а формируемая транспортная сеть обеспечивает возможность эффективного функционирования местных предприятий [3].

Взаимодействие отдельных кластеров обычно происходит через транспортные узлы, совокупность которых позволяет сформировать единую региональную транспортную сеть, охватывающую все хозяйствующие субъекты.

Кроме того, транзитные грузовые потоки приводят к необходимости создания транспортных коридоров с преимущественно транзитным движением. Это следует учитывать при формировании межрегионального уровня системы [4, 5].

Таким образом, в общем случае структура межрегиональной транспортной системы может включать три уровня (местный, региональный и межрегиональный), различающихся по составу и выполняемым функциям. Функционирование многоуровневых систем следует оптимизировать на каждом структурном уровне с учетом того или иного целевого назначения.

Отметим, что количество структурных уровней системы может быть меньше трех, а существующие методы структурного анализа не дают возможности определять их число и составные элементы. Это обусловило необходимость разработать метод структурного анализа и количественных критериев, позволяющих определять число и состав структурных уровней межрегиональных транспортных систем.

Рассмотрим фрагмент межрегиональной транспортной системы (рис. 1). В со-

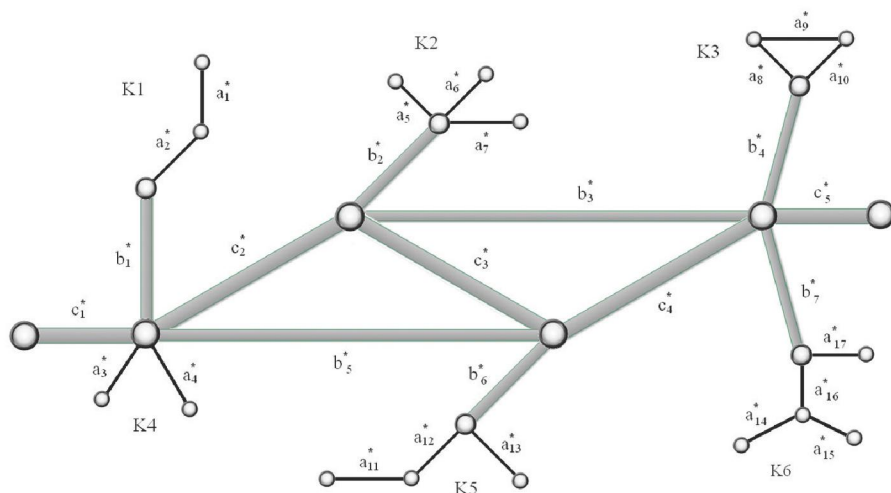


Рис. 1. Фрагмент межрегиональной транспортной системы

Таблица 1. Характеристики элементов межрегиональной транспортной системы

Обозначение множества и его элементов	Уровень системы, порядковый номер элемента, $i$	Длина, км	Величина общего грузопотока, т/сут
$A^*$	Местный	$l_i^{A^*}$	$q_i^{A^*}$
$a_1^*$	1	23	6110
$a_2^*$	2	18	4960
$a_3^*$	3	31	5740
$a_4^*$	4	17	6600
$a_5^*$	5	27	4140
$a_6^*$	6	36	5120
$a_7^*$	7	32	7220
$a_8^*$	8	31	7740
$a_9^*$	9	24	7910
$a_{10}^*$	10	26	8800
$a_{11}^*$	11	18	7140
$a_{12}^*$	12	25	9300
$a_{13}^*$	13	34	10 140
$a_{14}^*$	14	22	6840
$a_{15}^*$	15	31	10 200
$a_{16}^*$	16	29	11 220
$a_{17}^*$	17	32	11 140
$B^*$	Региональный	$l_i^{B^*}$	$q_i^{B^*}$
$b_1^*$	1	33	8100
$b_2^*$	2	44	8850
$b_3^*$	3	61	8260
$b_4^*$	4	34	10 920
$b_5^*$	5	45	7760
$b_6^*$	6	42	10 650
$b_7^*$	7	46	9730
$C^*$	Межрегиональный	$l_i^{C^*}$	$q_i^{C^*}$
$c_1^*$	1	67	27 200
$c_2^*$	2	36	26 650
$c_3^*$	3	30	24 150
$c_4^*$	4	59	23 950
$c_5^*$	5	63	26 340

ставе представленной сети шесть кластеров:  $K_1, K_2, \dots, K_6$ . В структуре кластеров имеются транспортные пути, характеризующиеся участками различной длины, которые соединяют действующие на местном уровне предприятия. Совокупность таких участков системы формирует местный уровень, его элементы в дальнейшем обозначаются  $a_i^*$  и образуют множество  $A^* (i = 1, 2, \dots, 17)$ .

Часть системы составляют участки, соединяющие узлы отдельных кластеров, т. е. образующие единую транспортную сеть на региональном уровне. Эти участки как элементы межрегиональной транспортной системы обозначаются в дальнейшем  $b_i^*$  и определяют состав множества  $B^* (i = 1, 2, \dots, 7)$ .

Кроме того, в системе имеются элементы, обеспечивающие прохождение транзитных грузопотоков, которые

обозначаются  $c_i^*$ , а их совокупность, составляющая множество  $C^* (i = 1, 2, \dots, 5)$ , образует межрегиональный уровень системы, характеризующийся высокой интенсивностью транзитного движения.

Таким образом, каждый участок сети как элемент транспортной системы характеризуется принадлежностью к определенному структурному уровню, фактической длиной транспортного пути и суммарной величиной грузопотока в двух противоположных направлениях. Характеристики структурных элементов системы (рис. 1) представлены в табл. 1.

Однако использование наблюдаемых значений грузопотоков  $q$  (т/сут) и существующих расстояний  $l$  (км) с указанной размерностью при графическом отображении структуры системы (рис. 2) нецелесообразно.

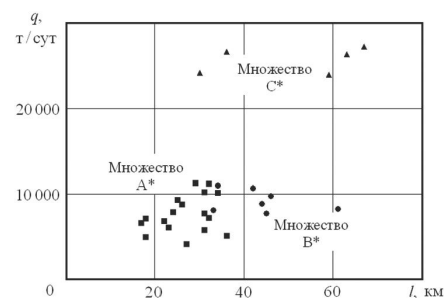


Рис. 2. Графическое представление элементов транспортной системы

Связано это с тем, что при описании свойств систем предпочтительно использовать безразмерные показатели, поэтому в дальнейшем вместо исходных множеств  $A^*, B^*, C^*$  с наборами элементов  $a_i^*, b_i^*, c_i^*$  используются преобразованные множества  $A, B, C$  с элементами  $a_i, b_i, c_i$ .

При этом безразмерные координаты элементов, принадлежащих  $A$ , вычисляются по формуле

$$\begin{cases} x_i^A = \frac{l_i^{A^*} - l_{\min}}{l_{\max} - l_{\min}} \\ y_i^A = \frac{q_i^{A^*} - q_{\min}}{q_{\max} - q_{\min}} \end{cases},$$

где:  $l_{\max}, l_{\min}$  – максимальное и минимальное значение длины транспортного участка по всем элементам, принадлежащим множествам  $A^*, B^*, C^*$ , соответственно;

$q_{\max}, q_{\min}$  – максимальная и минимальная величина суммарного грузопотока по всем элементам, принадлежащим множествам  $A^*, B^*, C^*$ , соответственно.

Аналогичным образом определяют безразмерные координаты элементов, принадлежащих множествам  $B$  и  $C$ .

Для рассматриваемой межрегиональной транспортной системы с характеристиками элементов, приведенными в табл. 1, в системе координат  $YOX$  на рис. 3 показаны группы точек, характеризующих новые множества  $A, B$  и  $C$ . Видно, что переход к новым безразмерным параметрам для описания свойств межрегиональной транспортной системы приводит к следующему: все точки, принадлежащие множествам  $A, B$  и  $C$ , находятся в границах квадрата, сторона которого равна единице. Это упрощает процедуру оценки их взаимного расположения. Кроме того, видно, что элементы, принадлежащие множествам  $A$  и  $B$ , расположены таким образом, что могут рассматриваться как принадлежащие одному структурному уровню.

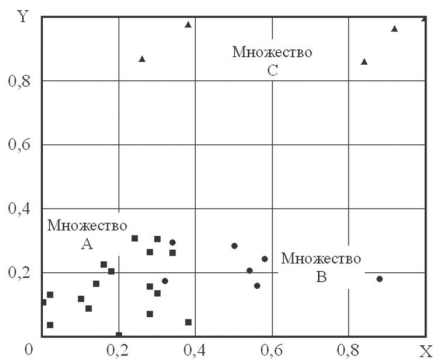


Рис. 3. Графическое представление элементов транспортной системы в виде совокупности точек в системе координат YOX

Это означает, что рассматриваемая система может быть не трех-, а двухуровневой. Для ответа на вопрос, какое же количество уровней имеет система, нужно провести дополнительный анализ.

Таким образом, для анализа структуры межрегиональных транспортных систем необходимо предварительно определить количество уровней, а также их состав. В общем случае межрегиональная система может включать три уровня (местный, региональный и межрегиональный), элементы которых  $a, b, c$  образуют на плоскости YOX неперекрывающиеся множества A, B и C. Чтобы определить количество структурных уровней системы и составляющих их элементов, нужно разработать критерии и алгоритмы, позволяющие оценивать взаимное расположение указанных множеств на плоскости с учетом их возможного перекрытия.

В дальнейшем близость элементов, принадлежащих множеству A, оценивается при помощи евклидова расстояния, определяемого на плоскости YOX. В этом случае понятие близости отдельных элементов совпадает с понятием их

геометрической близости, а характеристикой такого множества, состоящего из  $N_A$  элементов, служит наибольшее расстояние  $D_A$  между его точками. Диаметр множества представляет собой верхнюю грань расстояний между парами его точек [6].

При дальнейшем анализе в качестве центра множества рассматривается центроид [7], т. е. точка  $S_A$  на плоскости YOX с координатами

$$\bar{x}_A = \frac{\sum_{i=1}^{N_A} x_i^A}{N_A}; \quad \bar{y}_A = \frac{\sum_{i=1}^{N_A} y_i^A}{N_A}.$$

Такое определение положения центра множества приводит к тому, что за пределами окружности диаметром  $D_A$  с центром в точке  $S_A(\bar{x}_A, \bar{y}_A)$  может оказаться несколько точек.

Тем не менее, указанные характеристики могут быть использованы при оценке взаимного положения множеств на плоскости. В этом случае расстояние между множествами A и B, содержащими, соответственно,  $N_A$  и  $N_B$  элементов, определяется следующим образом:

$$D_{AB} = \sqrt{(\bar{x}_A - \bar{x}_B)^2 + (\bar{y}_A - \bar{y}_B)^2}.$$

Множества A и B рассматриваются далее как неперекрывающиеся при выполнении неравенства

$$\eta_{AB} = 1 - \frac{D_A + D_B}{2D_{AB}} > 0.$$

Критерий  $\eta_{AB}$  представляет собой показатель парной близости множеств A и B. Он принимает положительные значения, если рассматриваемые множества удалены на плоскости YOX и их элементы не смешиваются. В противном случае  $\eta_{AB} \leq 0$ . Если на плоскости YOX расположены три мно-

жества A, B и C, содержащие  $N_A, N_B$  и  $N_C$  элементов, диаметрами  $D_A, D_B$  и  $D_C$ , соответственно, то показателями парной близости для этих множеств служат  $\eta_{AB}, \eta_{AC}, \eta_{BC}$ .

Межрегиональную транспортную систему следует считать трехуровневой в том случае, если множества A, B и C не перекрываются. Для этого требуется выполнение следующих условий:

$$\begin{cases} \eta_{AB} > 0 \\ \eta_{AC} > 0 \\ \eta_{BC} > 0 \end{cases}$$

Очевидно, что такое взаимное расположение множеств не единственно возможное. На рис. 4 показаны некоторые варианты взаимного расположения перекрывающихся множеств на плоскости YOX. Это означает, что в зависимости от наблюдаемого сочетания знаков парных показателей близости  $\eta_{AB}, \eta_{AC}, \eta_{BC}$  структура транспортной системы может быть одно-, двух- или трехуровневой (табл. 2).

В связи с этим необходимо рассмотреть восемь возможных вариантов сочетаний знаков парных показателей близости, которым могут быть поставлены в соответствие структурные индексы систем с условными обозначениями S1, S2, ... S8. Определение структурного индекса – важный этап структурного анализа системы – в каждом конкретном случае должно выполняться в соответствии с данными, представленными в табл. 2.

Таким образом, структурный индекс – важнейшая характеристика межрегиональной транспортной системы, а возможное разнообразие всех наблюдаемых структур может быть описано с использованием восьми основных вариантов. При этом число структурных уровней и условий оптимального функционирования многоуровневых транспортных систем следует определять на основе предварительно устанавливаемого структурного индекса.

В табл. 3 для каждого структурного индекса приведены данные по возможному объединению перекрывающихся множеств, а также по количеству структурных уровней систем, соответствующих этим вариантам. Тогда в соответствии с предлагаемым подходом количество структурных уровней функционирующей межрегиональной транспортной системы нужно устанавливать в определенной последовательности.

После определения значений парных показателей близости с учетом сочета-

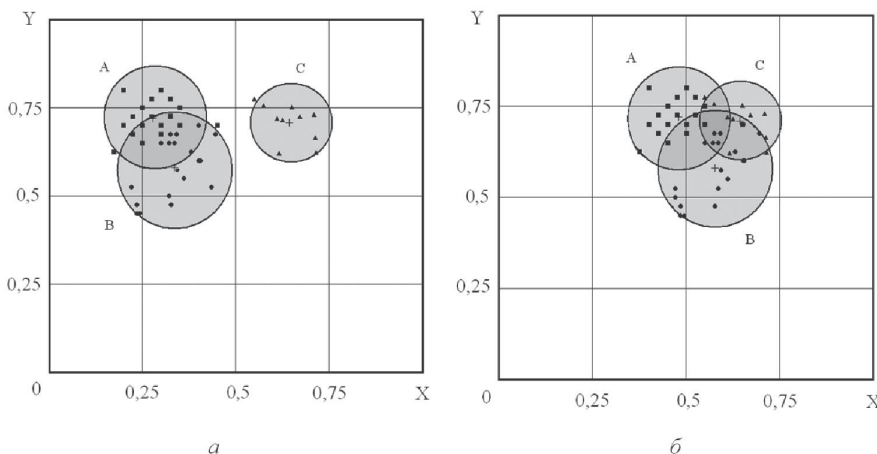


Рис. 4. Некоторые варианты взаимного расположения перекрывающихся множеств на плоскости YOX: а – перекрывающиеся множества A и B; б – перекрывающиеся множества A, B и C

Таблица 2. Структурные характеристики многоуровневых транспортных систем

Условное обозначение структурного индекса системы	Схема взаимного расположения отдельных множеств	Знаки парных показателей близости		
		$\eta_{AB}$	$\eta_{AC}$	$\eta_{BC}$
S1		+	+	+
S2		-	+	+
S3		+	-	+
S4		+	+	-
S5		-	-	+
S6		-	+	-
S7		+	-	-
S8		-	-	-

ния их знаков и с использованием данных табл. 2 устанавливается структурный индекс анализируемой системы.

Далее принимается решение о том, какие из перекрывающихся множеств должны быть объединены, а какие следует рассматривать как частично перекрывающиеся.

Окончательное решение о количестве структурных уровней анализируемой системы принимается после объединения перекрывающихся множеств в соответствии с данными табл. 3.

Таким образом, в процессе решения задачи по определению числа структурных уровней транспортных систем возникает необходимость разработать критерии и правила принятия решений, связанные с возможным объединением частично перекрывающихся множеств. Рассмотрим эту процедуру подробнее. Предположим, что два множества  $W$  и  $V$  с диаметрами  $D_W$  и  $D_V$  частично перекрываются. При этом  $D_W > D_V$ , а величина их перекрытия  $Z > 0$  (рис. 5).

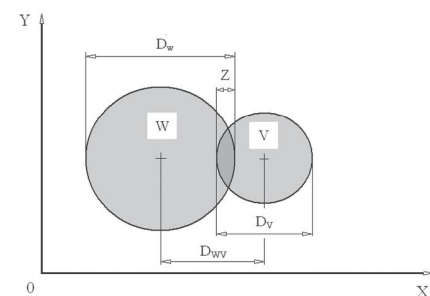


Рис. 5. Взаимное расположение частично перекрывающихся множеств  $W$  и  $V$

Таблица 3. Структурные индексы систем и соответствующие им варианты структурных уровней

Условное обозначение структурного индекса системы	Количество уровней транспортной системы при выполнении соответствующих условий			
S1	Три уровня			
S2	Два уровня при объединении A & B	Три уровня при частичном перекрытии A и B		
S3	Два уровня при объединении A & C	Три уровня при частичном перекрытии A и C		
S4	Два уровня при объединении B & C	Три уровня при частичном перекрытии B и C		
S5	Один уровень при объединении B & A & C	Два уровня при объединении B & A и частичном перекрытии A и C	Два уровня при объединении A & C и частичном перекрытии B и A	Три уровня при частичном перекрытии B и A, а также A и C
S6	Один уровень при объединении A & B & C	Два уровня при объединении A & B и частичном перекрытии B и C	Два уровня при объединении B & C и частичном перекрытии A и B	Три уровня при частичном перекрытии A и B, а также B и C
S7	Один уровень при объединении A & C & B	Два уровня при объединении A & C и частичном перекрытии C и B	Два уровня при объединении C & B и частичном перекрытии A и C	Три уровня при частичном перекрытии A и C, а также C и B
S8	Один уровень при объединении A & C & B			

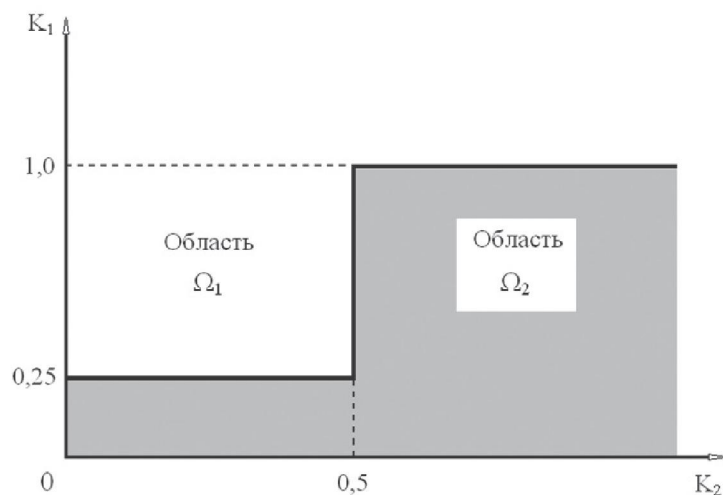


Рис. 6. Области  $\Omega_1$  и  $\Omega_2$  значений коэффициентов  $K_1$  и  $K_2$ , для которых принимаются альтернативные решения по объединению перекрывающихся множеств

Определим коэффициенты  $K_1$  и  $K_2$  как следующие безразмерные относительные величины:  $K_1 = \frac{D_V}{D_W}$ ;  $K_2 = \frac{Z}{D_V}$ . где  $Z$  – величина частичного перекрытия множеств (рис. 5).

Поскольку  $D_W \geq D_V$ , коэффициент  $0 < K_1 \leq 1$ . Если значение  $0 < K_1 \leq 0,25$ , то вследствие относительно небольшого диаметра множества  $V$  независимо от величины перекрытия  $Z$  можно считать, что множество  $V$  представляет собой «выброс», который следует включить в состав основного множества  $W$ .

Анализируя возможное изменение коэффициента  $K_2$  с увеличением перекрытия  $Z$ , следует отметить, что при выполнении условия  $K_2 \geq 0,5$  центроид множества  $V$  попадает в границы множества  $W$ , определяемые окружностью диаметром  $D_W$ . По этой причине неравенство  $K_2 \geq 0,5$  рассматривается в дальнейшем как достаточное основание для объединения частично перекрывающихся множеств  $W$  и  $V$ .

Графическое представление предлагаемого алгоритма объединения перекрывающихся множеств показано на рис. 6. Для области  $\Omega_1$  значений коэффициентов  $K_1$  и  $K_2$  частично перекрывающиеся множества  $W$  и  $V$  следует рассматривать как отдельные с частичным «перемешиванием» отдельных элементов.

Для области  $\Omega_2$  значений коэффициентов  $K_1$  и  $K_2$  следует считать целесообразным объединение множеств  $W$  и  $V$  вследствие значительного перекрытия и «перемешивания» их элементов.

Таким образом, разработанный метод определения числа структурных уровней межрегиональной транспортной системы основан на предварительном установлении ее структурного индекса с последующим принятием решений по объединению перекрывающихся множеств.

После определения числа уровней и уточнения принадлежности отдельных элементов каждому из них следует перейти к оптимизации функционирования системы в целом.

Использование разработанного метода структурного анализа в отношении системы, представленной на рис. 1, позволяет заключить, что, несмотря на частичное перекрытие множеств  $A$  и  $B$  (рис. 7) не следует их объединять (поскольку  $K_1 = 0,70$  и  $K_2 = 0,34$ ), а систему необходимо рассматривать как трехуровневую со структурным индексом  $S_2$ .

Таким образом, основу разработанного метода структурного анализа транспортной системы составляет предварительное разделение множества составных элементов на отдельные подмножества, принадлежащие местному региональному и межрегиональному уровням, с дальнейшей оценкой их взаимного расположения при помощи разработанных показателей парной близости и с уточнением действительного числа уровней анализируемой системы с учетом возможного объединения перекрывающихся подмножеств.

Определение числа уровней транспортной системы и их состава

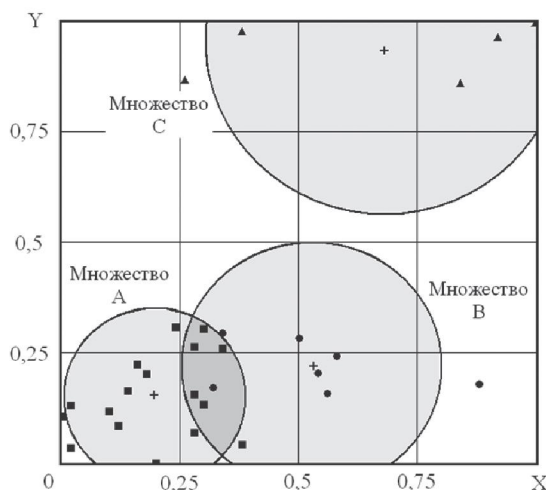


Рис. 7. Взаимное расположение на плоскости множеств  $A, B$  и  $C$  как элементов межрегиональной транспортной системы со следующими расчетными характеристиками:  $D_{AB} = 0,341, D_{AC} = 0,918, D_{BC} = 0,73, D_A = 0,391, D_B = 0,56, D_C = 0,752, \eta_{AB} = -0,393, \eta_{AC} = 0,378, \eta_{BC} = 0,101$

ва позволяет оптимизировать функционирование системы на каждом структурном уровне, а также оценивать целесообразность и планировать осуществление практических мероприятий, связанных с перспективным развитием и усовершенствованием ее структуры.

**Литература**

1. Прокофьева Т. А., Лопатин О. М. Логистика транспортно-распределительных систем: региональный аспект. М.: Консультант, 2003. 400 с.
2. Смехов А. А. Основы транспортной логистики: учеб. для вузов. М.: Транспорт, 2001. 197 с.
3. Тарарычкин И. А., Слободянюк М. Э., Нечаев Г. И. Методологические принципы формирования и оптимизации функционирования межрегиональных транспортных систем // Транспорт РФ. 2014. № 1 (50). С. 29–33.
4. Афанасьев Л. Л. и др. Единая транспортная система и автомобильные перевозки: учеб. для студентов вузов. М.: Транспорт, 2003. 333 с.
5. Мультимодальные транспортные коридоры (системный подход) / В. И. Галахов, Б. А. Левин, В. Н. Морозов и др. М.: Транспорт, 2001. 71 с.
6. Мишина А. М., Орлов В. Б. Толковый математический словарь: Основные термины. М.: Рус. яз., 1989. 244 с.
7. Мантуров О. В., Солнцев Ю. К., Соркин Ю. И. и др. Толковый словарь математических терминов. М.: Просвещение, 1965. 540 с.