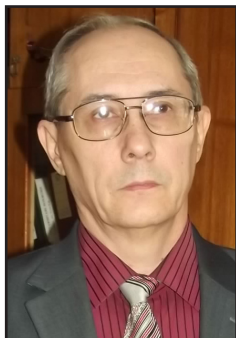


Формирование территориально-производственных кластеров на базе адаптивной транспортной инфраструктуры



Игорь ТАРАРЫЧКИН

Igor A. TARARYCHKIN

Formation of Territorial – Industrial Clusters Based On Adaptive Transport Infrastructure

(текст статьи на англ. яз. – English text of the article – p. 44)

Разработан метод формирования территориально-производственных кластеров на базе гибко меняющейся и создаваемой транспортной инфраструктуры. Сформулированы целевые функции и количественные критерии, позволяющие устанавливать положение транспортных узлов системы на местном уровне. Показано, что расположение транспортного узла зависит от того, является ли он активным или пассивным. Предложены расчётные зависимости, позволяющие решать задачу структурного синтеза в рамках региональной транспортной системы.

Ключевые слова: транспорт, система, синтез, инфраструктура, оптимизация, кластеры, территория, производство.

Тарарычкин Игорь Александрович – доктор технических наук, профессор кафедры «Транспортные системы» Луганского национального университета им. В. Даля, Луганск, Украина.

Известные методы синтеза логистических транспортных систем в ряде случаев не позволяют решать задачу формирования их оптимальной структуры, что связано как с противоречивостью условий и ограничений, которые должны быть соблюдены при её реализации, так и со сложностью вычислительной процедуры, обусловленной наличием большого числа эксплуатационных факторов [1–6].

Если производственный кластер формируется на новой территории, а транспортная сеть и соответствующая инфраструктура создаются под ожидаемые потребности в грузовых перевозках, то процесс формирования местного уровня такой системы требует учета ряда специфических особенностей [7]. Рассмотрим этот вопрос подробнее.

Предположим, что производственный кластер состоит из шести точечных элементов $M_1, \dots, M_6$, расположение которых схематично показано на рис. 1а. Будем считать, что между каждой парой элементов существуют транспортные пути, а за рассматриваемый период времени между всеми элементами выполняются грузовые перевозки единичного объёма ($q_{i,j} = 1$ т/сут, для любых сочетаний $i \neq j$).

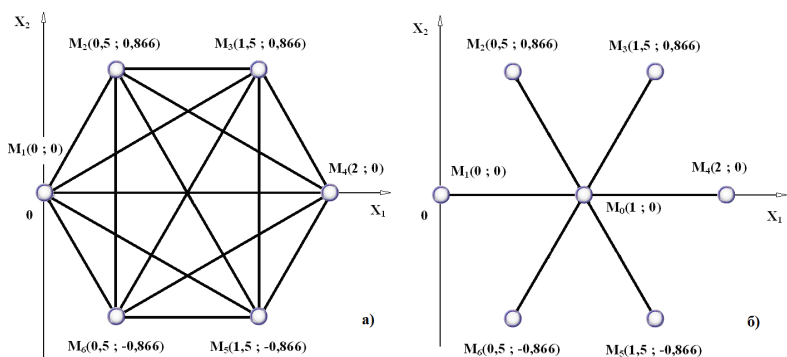


Рис. 1. Схема формирования структуры кластеров, в составе которых имеется по шесть точечных элементов \$M_1, \dots, M_6\$.

Если исходить из условия минимизации выполняемой транспортной работы, то каждая пара элементов кластера должна соединиться между собой транспортными путями в виде отрезков прямых линий. В таком случае общая протяженность транспортной сети:

$$L_{\Sigma} = 0,5 \cdot \sum_{i=1}^6 \sum_{j=1}^6 l_{i,j}.$$

Суммарная транспортная работа в границах формируемого таким способом кластера:

$$Q_w = \sum_{i=1}^6 \sum_{j=1}^6 q_{i,j} \cdot l_{i,j}.$$

Принятый вариант формирования транспортной сети обеспечивает достижение минимума общей транспортной работы \$Q_w\$. Однако следует также признать, что такое решение влечёт за собой неоправданное увеличение общей протяженности используемых транспортных путей.

Так, несложно показать, что для рассматриваемого примера формирования сети общая длина транспортных путей составляет \$L_{\Sigma} = 22,39\$ км, а выполняемая суммарная транспортная работа \$Q_w = 44,78\$ т·км. Если же в состав кластера добавить транспортный узел \$M_0\$ (рис. 1б), то общая протяженность используемых путей будет \$L_{\Sigma}^* = 6\$ км, а суммарная транспортная работа — \$Q_w^* = 60\$ т·км.

Это означает, что использование транспортного узла приводит, с одной стороны, к уменьшению общей протяженности транспортной сети (в рассматриваемом примере более чем в 3,7 раза), а с другой стороны, сопровождается некоторым увеличением выполняемой транспортной

работы (в данном случае примерно на 25%). Учитывая то обстоятельство, что строительство транспортных путей соответствующей инфраструктуры и дальнейшее их поддержание в работоспособном состоянии являются весьма затратными с финансовой точки зрения, то требование, связанное с обеспечением абсолютного минимума транспортной работы, выполняемой в границах вновь создаваемого территориально-производственного кластера, нельзя признать оправданным.

Наиболее приемлемыми в этих условиях будут требования по синтезу такой структуры, которая способна обеспечить минимальный уровень выполняемой транспортной работы в сочетании с наименьшей суммарной протяженностью всех используемых транспортных путей.

Тогда целевая функция, определяющая требования к структуре системы на местном уровне, формулируется так:

$$I_z = Q_w \cdot L_{\Sigma} \rightarrow \min. \quad (1)$$

Таким образом, рассмотренный пример показывает, что процесс формирования структуры кластера на базе вновь создаваемой инфраструктуры связан как с необходимостью использования соответствующей целевой функции (1), так и с определением положения транспортного узла, если его включение в состав кластера оказывается целесообразным. При этом определение координат узла \$M_0\$ представляет собой самостоятельную задачу, которая должна быть решена отдельно.

Рассмотрим в этой связи задачу определения положения транспортного узла кластера, формируемого на базе четырех точечных элементов (рис. 2). Соответству-

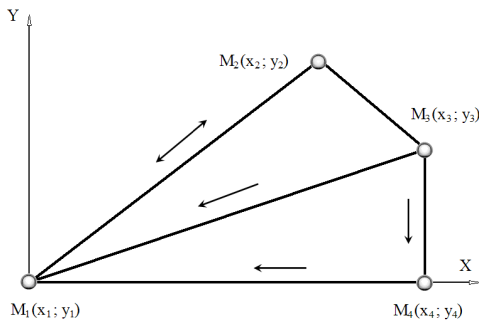


Рис. 2. Схема взаимного расположения отдельных структурных элементов кластера и направления осуществляемых грузовых перевозок.

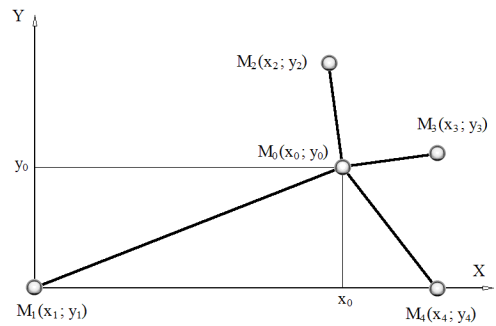


Рис. 3. Схема расположения элементов кластера и транспортного узла M_0 .

Таблица 1

Координаты точечных элементов производственного кластера

Координаты элементов кластера M_i	Значение индекса i			
	1	2	3	4
x_i , км	0	16	22	22
y_i , км	0	15	8	0

ющие координаты этих элементов в системе $Y0X$ представлены в таблице 1.

Объемы перевозок между отдельными точками задаются матрицей $\|Q\|$ [7] с элементами $q_{i,j}$ [тыс. т / сут.]:

$$\|Q\| = \begin{bmatrix} 0 & 1,6 & 0 & 0 \\ 0,2 & 0 & 1,8 & 0 \\ 1,52 & 0 & 0 & 1,2 \\ 0,7 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

Предположим, далее, что в состав кластера включен дополнительный элемент M_0 , выполняющий роль транспортного узла (рис. 3).

Поскольку все транспортные пути в границах кластера будут проходить через узел $M_0(x_0; y_0)$, то это приводит к появлению объездных маршрутов и изменению путей доставки. Положение точки M_0 на плоскости $Y0X$ определяется из условия:

$$I_z(x_0; y_0) \rightarrow \min. \quad (2)$$

А решить необходимо следующую систему уравнений:

$$\begin{cases} \frac{\partial I_z(x_0, y_0)}{\partial x} = 0 \\ \frac{\partial I_z(x_0, y_0)}{\partial y} = 0. \end{cases} \quad (3)$$

Для принятой системы исходных данных (таблица 1) координаты узла M_0 на плоскости $Y0X$:

$$\begin{cases} x_0 = 19,2 \text{ км} \\ y_0 = 7,5 \text{ км}. \end{cases}$$

Несложно показать, что общая протяженность транспортных путей в границах кластера с узлом $M_0(19,2; 7,5)$ составляет $L_\Sigma^* = 39,6$ км, а выполняемая транспортная работа $Q_T^* = 140,3$ тыс. т • км/сут. Если же кластер не имеет единого узла, то общая длина транспортных путей для заданного варианта расположения элементов $M_1, \dots, M_4$: $L_\Sigma = 84,6$ км, а выполняемая в границах кластера транспортная работа составит $Q_T = 116,7$ тыс. т • км/сут.

Таким образом, полученные результаты позволяют заключить, что включение в состав рассматриваемого кластера дополнительного элемента M_0 приводит к увеличению объема выполняемой транспортной работы примерно на 20% и одновременно снижению общей протяженности транспортных путей более чем в 2 раза.

В целом разработанный метод, основанный на использовании целевой функции (2), позволяет установить положение на плоскости дополнительного структурного элемента M_0 .

Однако при этом следует отметить и некоторые особенности, связанные с решением такого рода задач. Так, если в состав показанного на рис. 2 кластера добавить элемент M_5 , расположенный вблизи точки M_1 и технологически связанный только с этой точкой (рис. 4), то грузовые перевозки между этими элементами через узел M_0 выполнять нецелесообразно из-за чрезмерно возрастающей длины транспортного пути.

Таблица 2

Координаты отдельных структурных элементов кластера

Координаты точек $M_i(x_i; y_i)$	Значение индекса i									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
x_i , км	13	21	80	17	24	18	0,5	0	86	95
y_i , км	4	53	6	58	58	48	7	0	13	5

Такого рода структурные элементы-спутники следует исключить из рассмотрения до начала процедуры поиска положения точки M_0 . Позже, на этапе формирования кластера, спутники надо включить в его состав, несмотря на фактическое отсутствие перевозок через узел M_0 .

То есть в дальнейшем под спутником будем понимать такой элемент кластера, который при его функционировании связан исключительно с близлежащим точечным объектом при доставке грузов на сравнительно небольшие расстояния (обычно не более 10–20 км).

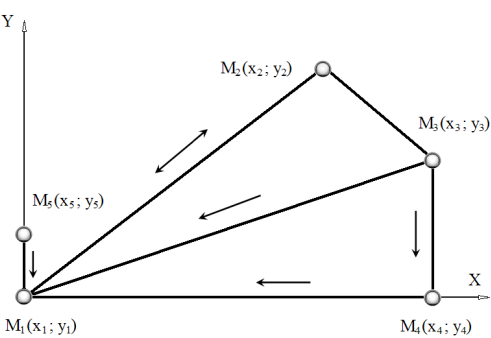


Рис. 4. Схема кластера, состоящего из пяти точечных элементов.

Таблица 3

Грузопотоки между отдельными элементами кластера $q_{i,j}$ [тыс. т·км/сут.]

Значения индексов i и j		Индекс i									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Индекс j	1	0	0	1,16	0	0	0	0	0	0	0
	2	0,52	0	2,2	0	0	0	0	0	0	0
	3	0	0,86	0	0	0	0	0	0	0	0
	4	0	0,12	0	0	0	0	0	0	0	0
	5	0	0	0	0,12	0	0	0	0	0	0
	6	0	0,22	0	0	0	0	0	0	0	0
	7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	9	0	0	0,16	0	0	0	0	0	0	0
	10	0	0	0,22	0	0	0	0	0	0	0

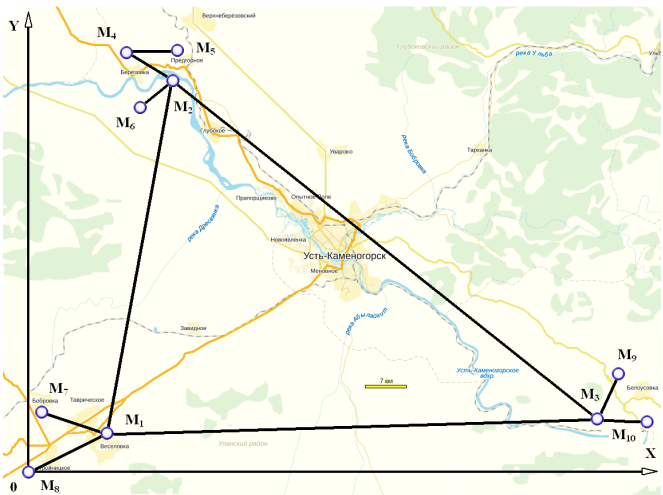


Рис. 5. Схема взаимного расположения точечных элементов производственного кластера.



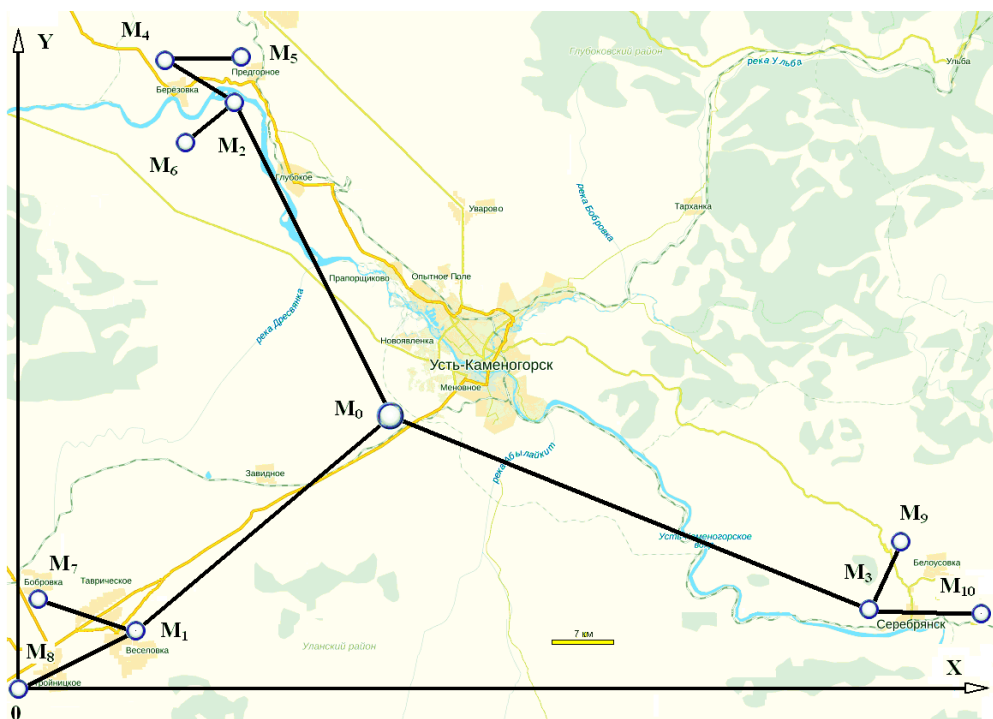


Рис. 6. Структура кластера с транспортным узлом M_0 и тремя группами элементов-спутников.

Если спутников несколько, то при определении положения M_0 их наличие также не учитывается, а после нахождения координат M_0 в соответствии с изложенным методом связь спутников с прежними структурными элементами восстанавливается.

Рассмотрим процедуру формирования такого рода кластеров на конкретном примере.

Предположим, формирование структуры будет происходить на основе совокупности из десяти взаимосвязанных элементов $M_1, \dots, M_{10}$, показанных на рис. 5. Координаты этих элементов на плоскости приведены в таблице 2.

Следует также отметить, что при нумерации элементов M_i значения индексов присваиваются последовательно только тем точкам, которые будут участвовать в формировании транспортной сети на первом этапе. В данном случае это элементы M_1 , M_2 и M_3 . Остальные точки рассматриваются как элементы-спутники и в дальнейшем индексируются произвольно, поскольку непосредственного участия в процедуре определения положения транспортного узла не принимают.

Данные, характеризующие грузоперевозки в границах рассматриваемого кластера, приведены в таблице 3.

По результатам выполненных расчетов можно заключить, что для принятой системы исходных данных оптимальным является положение точки M_0 на плоскости, которое характеризуется следующими координатами:

$$\begin{cases} x_0 = 36 \text{ км} \\ y_0 = 24 \text{ км} \end{cases}$$

Схематическое изображение синтезированной структуры кластера в составе десяти точечных элементов $M_1, \dots, M_{10}$ транспортного узла M_0 и соответствующих транспортных путей показано на рис. 6.

Таким образом, транспортный узел отдельного кластера может выполнять роль как его структурной составляющей, так и элемента, принадлежащего региональному уровню транспортной системы, если принятие такого решения оказывается целесообразным [8–11].

Однако здесь существует особенность, связанная с тем, что если транспортный узел кластера является одновременно и структурным элементом регионального уровня, то он может выполнять функцию

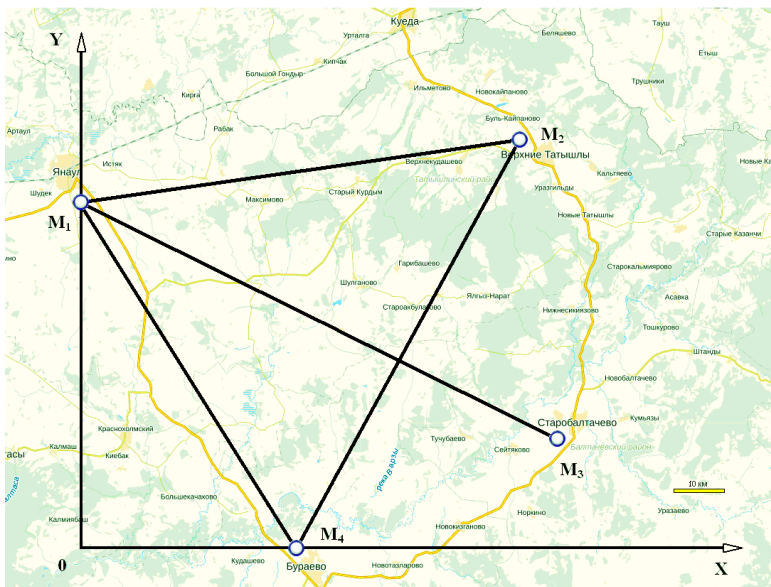


Рис. 7. Схема взаимного расположения структурных элементов кластера.

источника или потребителя грузовых потоков. Если это действительно так, то учет дополнительных грузопотоков, связанных с функционированием регионального уровня системы, может быть мотивирован необходимостью последующего уточнения положения этого узла, для чего должна быть разработана соответствующая методика.

Рассмотрим указанную особенность подробнее. Предположим, анализируемый кластер связан с другими таким образом, что грузовые потоки через транспортный узел невелики и их можно не учитывать в расчётах, или же эти потоки нельзя рассматривать как устойчиво существующие в течение длительного периода времени при доставке грузов отдельным потребителем в составе кластера.

Если данное условие выполняется, то такой транспортный узел считается пассивным, а его положение в границах кластера определяется на основе разработанного выше метода.

Если же транспортный узел функционирует таким образом, что в течение длительного времени через него осуществляется доставка грузов извне в адрес конкретных точечных элементов кластера и пренебречь такого рода грузоперевозками невозможно или нецелесообразно, то такой узел называется активным.

В том случае, если через активный узел M_0 на постоянной основе осуществляется

доставка грузов i -му элементу кластера M_i ($i \neq 0$), то характеристикой активного узла как самостоятельного источника грузопотоков в адрес элемента M_i будет величина $q_{0,i}$. И наоборот, если элемент M_j ($j \neq 0$) осуществляет отправку грузов на постоянной основе через узел M_0 в адрес иных кластеров, то активность такого узла как потребителя транспортных потоков со стороны M_j будет характеризоваться величиной $q_{j,0}$. Все это означает, что корректировка положения транспортного узла может потребоваться только тогда, когда узел является активным. При этом его характеристики активности $q_{0,i}$ и $q_{j,0}$ должны быть известны.

Рассмотрим активный транспортный узел M_0 , соединяющий n элементов кластера. В отличие от пассивного узла его функционирование связано с наличием исходящих и входящих потоков, характеризующихся набором значений $q_{0,i}$ и $q_{i,0}$ ($i = 1, 2, \dots, n$), часть из которых может быть равной нулю. Дополнительная транспортная работа, выполняемая в границах анализируемого кластера и связанная с активностью транспортного узла M_0 , определяется так:

$$Q_D = \sum_{i=1}^n (q_{0,i} + q_{i,0}) \cdot l_{i,0}.$$

Тогда по аналогии с рассмотренным ранее случаем целевая функция при заданном положении активного узла $M_0(x_0; y_0)$ будет таковой:



Координаты отдельных структурных элементов кластера

Координаты точек $M_i(x_i; y_i)$	Значение индекса i			
	1	2	3	4
x_i , км	0	81,1	88,4	40,2
y_i , км	64,3	77,1	20,1	0

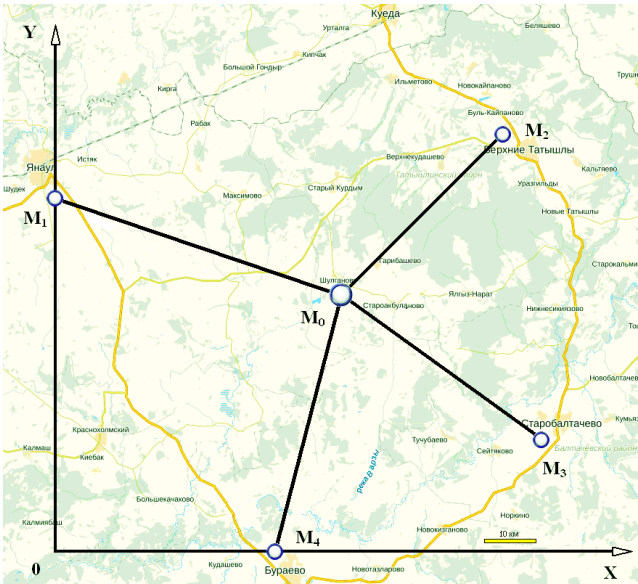


Рис. 8. Схема кластера с пассивным транспортным узлом M_0 .

$$\begin{aligned}
 I_Z(x_0; y_0) = & \left\{ \sum_{i=1}^n \sqrt{(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2} \right\} \times \\
 & \times \left\{ \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n q_{i,j} \cdot m_{i,j} \cdot \left[\sqrt{(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2} + \right. \right. \\
 & \left. \left. + \sqrt{(x_j - x_0)^2 + (y_j - y_0)^2} \right] + \right. \\
 & \left. + \sum_{i=1}^n (q_{0,i} + q_{i,0}) \cdot \sqrt{(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2} \right\}.
 \end{aligned}$$

Положение транспортного узла на плоскости определяется из условия (2) и связано с решением системы уравнений (3).

Для иллюстрации возможностей разработанного метода определения координат активного транспортного узла возьмем пример формирования кластера на основе данных, представленных на рис. 7. Координаты элементов, входящих в состав рассматриваемого кластера, приведены в таблице 4.

Матрица грузопотоков с элементами $q_{i,j}$ [тыс. т/сут.] имеет вид:

$$\|Q\| = \begin{vmatrix} 0 & 2,2 & 0 & 1,66 \\ 0,65 & 0 & 0 & 0,82 \\ 1,16 & 0 & 0 & 1,2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{vmatrix}.$$

Если транспортный узел является пассивным, то его координаты, установленные по результатам расчетов:

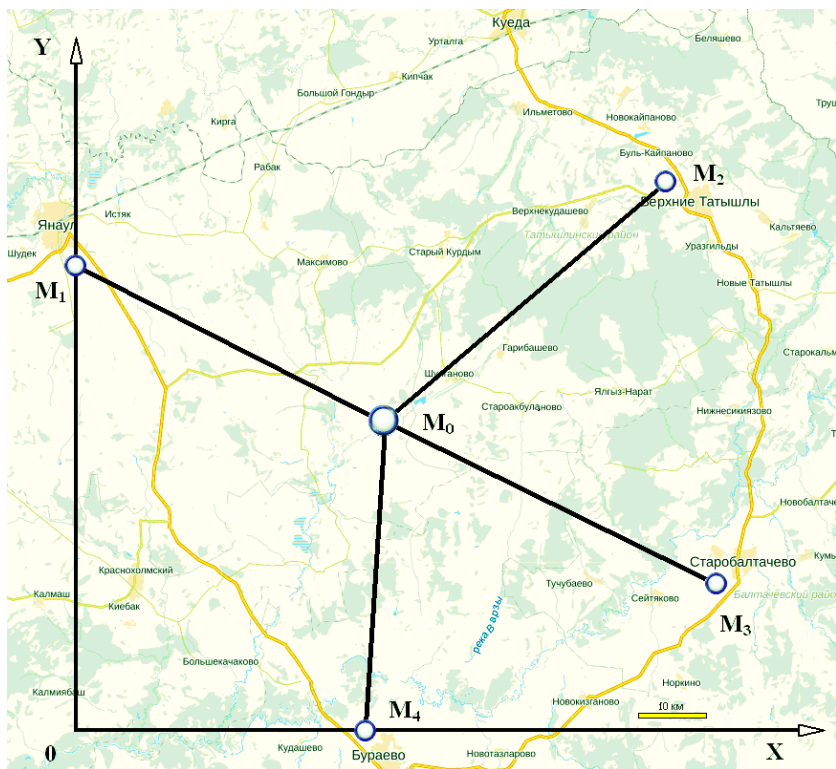
$$\begin{cases} x_0 = 45,7 \text{ км} \\ y_0 = 45 \text{ км}. \end{cases}$$

Положение такого узла, в предположении о пренебрежительно малом уровне взаимодействия точечных элементов кластера с региональным уровнем системы, показано на рис. 8.

Если же узел активен и имеет свои характеристики активности: $q_{0,2} = 1,86$ тыс. т • км/сут., $q_{2,0} = 0,18$ тыс. т • км/сут., $q_{0,3} = 0,22$ тыс. т • км/сут., то для определения его положения на плоскости следует учитывать дополнительные объемы выполняемой транспортной работы, возникающей при функционировании регионального уровня системы.

Структура кластера с активным узлом, положение которого устанавливалось с использованием разработанного метода, для принятых показателей активности показана на рис. 9.

Сравнение данных, представленных на рис. 8 и 9, позволяет заключить, что нали-



чие грузопотоков на региональном уровне и взаимодействие между кластерами действительно влияют на положение транспортных узлов, что необходимо учитывать при решении задач структурного синтеза.

Итак, вывод прост: разработан метод формирования территориально-производственных кластеров на базе вновь создаваемой транспортной инфраструктуры, способной помочь в определении положения транспортного центра на основе сформулированной целевой функции.

ЛИТЕРАТУРА

1. Вельможин А. В., Гудков В. А., Миротин Л. Б. Теория транспортных процессов и систем. — М.: Транспорт, 1998. — 167 с.
2. Горев А. Э. Основы теории транспортных систем. — СПбГАСУ—СПб, 2010. — 214 с.
3. Белый О. В., Кокаев А. Г., Попов С. А. Архитектура и методология транспортных систем. — СПб: Элмор, 2002. — 256 с.
4. Тарарышкин И. А., Слободянюк М. Э., Нечаев Г. И. Анализ сетевой структуры и многопараметрическая оптимизация межрегиональных транспортных систем // Наука — образованию, производству, экономике: Материалы 12-й международной научно-

технической конференции. Т. 3. — Минск: БНТУ, 2014. — С. 259—260.

5. Тарарычкін І. А., Слободянюк М. Э., Нечаев Г. И. Методологические принципы формирования и оптимизации функционирования межрегиональных транспортных систем // Транспорт Российской Федерации. — 2014. — № 1. — С. 29—33.

6. Tararychkin I. Structural analysis of an interregional transport network and assessment of capability for its multi-level optimization / I. Tararychkin, G. Nechaev, M. Slobodyanyuk // Teka Kom. Mot. I Energ. Agr., 2013, Vol. 13, No 4, pp. 250—257

7. Тарарычкін І. А., Слободянюк М. Э., Нечаев Г. И. Формирование транспортных систем местного уровня на базе производственных кластеров // Вестник Всеукраинского национального университета им. В. Даля. — 2013. — № 6(195). — Ч. 2. — С. 31—35.

8. Тарарычкін І. А. Структура и функции межрегиональных транспортных систем // Мир транспорта. — 2015. — № 3. — С. 174—189.

9. Тарарычкін І. А. Структура логистических транспортных систем и особенности её формирования на местном уровне // Вестник Всеукраинского национального университета им. В. Даля. — 2014. — № 4(211). — Ч. 1. — С. 69—72.

10. Тарарычкін І. А., Слободянюк М. Э., Нечаев Г. И. Сетевая структура межрегиональных транспортных систем // Мир транспорта. — 2014. — № 1. — С. 102—111.

11. Тарарычкін І. А. Структурные уровни межрегиональных транспортных систем // Мир транспорта. — 2014. — № 3. — С. 22—33. ●

Координаты автора: **Тарарычкин И. А.** – donbass 888@mail.ru.

Статья поступила в редакцию 02.03.2016, принята к публикации 17.06.2016.

