

Автоматизация исследований развития опорной транспортной сети

М. А. Бульонков, Т. В. Нестеренко

Рассматривается система автоматизации научных исследований для решения задачи прогнозирования развития опорной транспортной сети России. Формальная модель транспортной сети допускает различные виды транспорта, продукты, узлы производства и потребления и сводится к задаче минимизации суммарной стоимости перевозок при совокупности набора линейных ограничений. Система предоставляет пользовательский интерфейс для задания и редактирования всех параметров транспортной сети. Особое внимание уделяется визуальному и интерактивному представлению результатов моделирования. Целостное восприятие результатов достигается за счёт отображения как входных данных (вид транспорта, пропускная способность, стоимость перевозки), так и результатов моделирования (перевозимый объём и загруженность плеча) непосредственно либо на карте, либо на схеме. При этом возможно отображение как отдельного продукта, так и всех вместе. На практике зачастую требуется решить задачу, обратную моделированию, например, выяснить, при каких тарифах объёмы перевозки по определённому плечу будут превосходить заданное значение. Для этого предлагается использовать стохастические методы, основанные на массовом решении транспортной задачи для множества варьируемых параметров, таких как пропускная способность транспортного плеча, тариф на перевозку груза или его обработку в транспортном узле. Методы кластеризации позволяют выделить из всего множества просчитанных вариантов относительно небольшое количество «типичных» решений. Это даёт возможность эксперту оценить как условия, так и вероятность прогнозируемой транспортной ситуации. Показано также, что такой подход позволяет автоматически выделять складывающиеся транспортные коридоры и определять зависимость объёмов перевозки по данному плечу от конкретного варьируемого параметра.

Ключевые слова: транспортная задача, моделирование, система автоматизации научных исследований.

1. Введение

В 2009 году творческий коллектив, состоящий из сотрудников СИМОиР, ИСИ СО РАН, ИЭиОПП СО РАН и НГУ, начал инициативный проект МИКС (Модельная Информационная Картографическая Система) [1], предусматривающий создание информационной среды, направленной на поддержку задач управления регионами и их взаимодействия между собой. В работе [2] была представлена система МИКС-ПРОСТОР, основным назначением которой являлась автоматизация экономических экспериментов, связанных с прогнозированием развития опорной транспортной сети. Эта система позволяет задать прогноз изменения параметров, описывающих услуги по перевозке грузов и их обработке в транспортных узлах, и решить задачу оптимальной перевозки в условиях конкуренции нескольких видов транспорта. Таким образом, мы получаем вариант развития опорной транспортной сети, обеспечивающий рациональное взаимодействие входящих в нее видов транспорта. Иными словами, мы решаем задачу прогнозирования путём имитационного моделирования типа «что-если» [3].

2. Моделирование типа «что-если»

На первом этапе задача состояла в основном в автоматизации процесса научных исследований. В тот момент у исследователей уже имелся весь необходимый аппарат для проведения экспериментов. Транспортная задача формулировалась как задача линейного программирования [4], в которой величинами являются объёмы и направление перевозки продуктов по плечам транспортной сети, коэффициентами – стоимость обработки грузов и длины плеч, а ограничения формулируются как неравенства вида:

- суммарный объём перевозимых по плечу продуктов вне зависимости от направления не должен превышать пропускной способности;
- объём ввозимого продукта должен быть равен сумме вывозимого и разгружаемого;
- объём потребляемого продукта должен быть не меньше объёма выгружаемого;
- и т.п.

Задача состоит в минимизации суммарных затрат на обработку грузов.

Рассмотрим формализованную постановку задачи.

Для задач прогнозирования развития транспортной сети используется экономическая модель [5], оперирующая следующими множествами:

P – множество всех видов груза,

T – множество всех видов транспорта,

R – множество всех транспортных узлов.

Каждое транспортное плечо определяется видом транспорта и парой узлов: (t, r, r') . Далее приведены ограничения, которые накладываются на параметры транспортной сети.

- Ограничения на погрузку и выгрузку:

$$\sum_t X_{tr}^p \leq A_r^p, \quad \sum_t Y_{tr}^p \geq B_r^p,$$

где A_r^p – объём продукта p , произведенного в узле r ;

X_{tr}^p – объём продукта p , погруженного на транспорт вида t в узле r ;

B_r^p – объём продукта p , потребленного в узле r ;

Y_{tr}^p – объём продукта p , выгруженного с транспорта вида t в узле r .

- Ограничения, связанные с обработкой в узле:

$$\sum_{r'} W_{tr'r}^p = Y_{tr}^p + \sum_{t'} V_{tt'r}^p + Z_{tr}^p, \quad X_{tr}^p + \sum_{t'} V_{tt'r}^p + Z_{tr}^p = \sum_{r'} W_{trr'}^p,$$

где Z_{tr}^p – объём продукта p , провезенного транзитом на t через узел r ;

$V_{tt'r}^p$ – объём продукта p , перегруженного с транспорта t на транспорт t' в узле r ;

$W_{tr'r}^p$ – объём продукта p , привезенного в узел r по плечу (t, r', r) ;

$W_{trr'}^p$ – объём продукта p , вывезенного из узла r по плечу (t, r, r') .

- Ограничения, связанные с пропускными способностями $P_{trr'}$, по плечу (t, r, r') , которые учитывают перевозку по плечу в обоих направлениях:

$$P_{trr'} = P_{tr'r}, \quad \sum_p (W_{trr'}^p + W_{tr'r}^p) \leq P_{trr'}.$$

Целевая функция модели является суммой издержек, связанных с переработкой грузов в транспортных узлах и с перевозкой грузов по плечам:

$$\sum_{t,r,p} \tilde{c}_t^p X_{tr}^p + \sum_{t,r,p} \tilde{c}_t^p Y_{tr}^p + \sum_{t,r,p} \tilde{c}_t^p Z_{tr}^p + \sum_{t,t',r,p} c_{tt'r}^p V_{tt'r}^p + \sum_{t,r,r',p} \varphi_{trr'}^p l_{trr'} W_{trr'}^p \rightarrow \min,$$

где коэффициенты $\tilde{c}_t^p$, $\tilde{c}_t^p$, $\tilde{c}_t^p$, $c_{tt'r}^p$ являются удельными (в пересчете на единицу груза) затратами на погрузку, выгрузку, обслуживание транзита и перегрузку с одного вида транспорта на другой соответственно, $l_{trr'}$ – длина плеча (t, r, r') , $\varphi_{trr'}^p$ – стоимость перевозки вдоль плеча единицы объема продукта на единицу расстояния.

Таким образом, мы имеем упрощенную постановку задачи, где коэффициенты при переменных X_{tr}^p , Y_{tr}^p , Z_{tr}^p , $V_{tt'r}^p$, $W_{trr'}^p$ являются константами.

Изначально исходные данные задавались в виде текстовых файлов стандартизованного формата и поступали на вход решателю, который представлял собой совокупность консольных программ [6]. Результат выдавался также в виде текстового файла. Таким образом, проведение единичного эксперимента могло занимать часы и даже дни.

Первоочередной задачей стало создание такого пользовательского интерфейса, который бы обеспечивал следующее:

- формирование транспортной сети: задание перечней видов транспорта и продуктов, узлов и плеч (дорог), их пропускной способности и длины;
- задание количества производимых и потребляемых в узлах продуктов, а также базовых тарифов перевозки продуктов по плечам и обработки в узлах (например, транзита или перегрузки с одного вида транспорта на другой);
- запуск решателя [7];
- визуализацию полученного результата.

Если для подготовки входных данных естественно использовать стандартные диалоговые возможности, то отображение результатов потребовало разработки специальных средств. Наиболее естественным представляется отображение транспортной сети на карте. По ряду соображений, обсуждение которых выходит за рамки данной работы, мы решили не привязываться к известным ГИС, даже если они и предоставляли программные интерфейсы для встраивания новой функциональности. Для наших целей и качественных требований оказалось достаточным решить проблему координатной привязки к «карте-подложке». Таким образом, система предоставляет на выбор одну из предобработанных карт, поверх которой отображаются узлы, плечи и прочие элементы транспортной сети.

На практике оказалось, что пространственное расположение на карте далеко не всегда удобно, например, в случае, когда «концентрация» узлов сильно отличается для разных регионов. Кроме того, дополнительная информация легче воспринимается, если плечи ортогональны и без изломов. Поэтому в дополнение к картам было разработано схематическое отображение сети, при котором приблизительно сохраняется взаимное расположение узлов. Грубо говоря, достаточно чтобы, Северный морской путь находился сверху, а Москва – левее Якутска, но необязательно, чтобы Диксон оказался правее Новосибирска. Два представления одной и той же транспортной сети показаны на рис. 1.

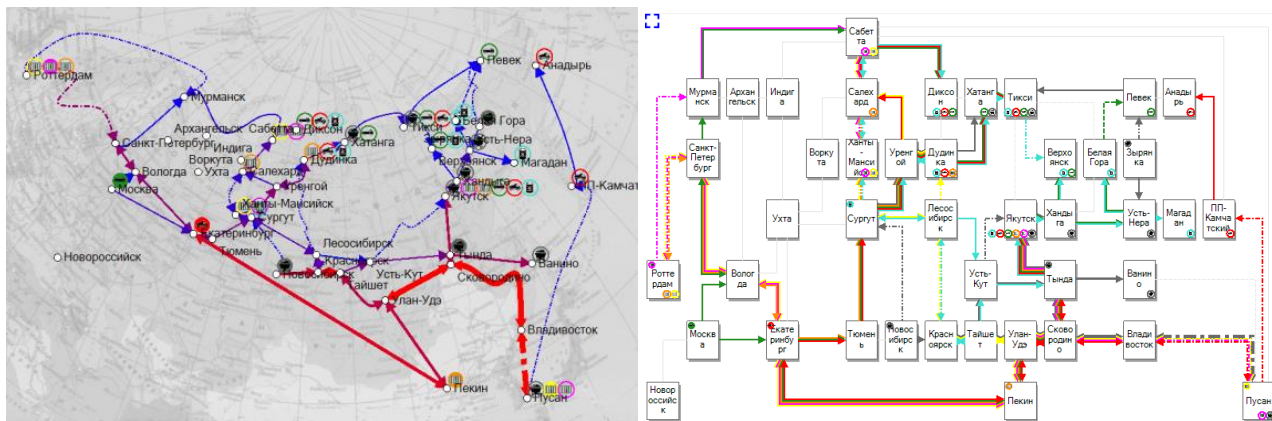


Рис. 1. Пространственное отображение транспортной сети

Для каждого плеча на карте или схеме требуется отобразить большое число параметров, таких как вид транспорта, пропускная способность, перевозимый объем и стоимость перевозки (в единицах на километр, для каждого вида продукта), загруженность плеча и т.д. При этом количество визуальных средств весьма ограничено: тип линии (сплошная, пунктирная и т.п.), её цвет и толщина. Использование всплывающих окон здесь не помогает, поскольку они не дают возможности получить общее представление о решении задачи. В текущей версии системы пользователь может выбрать один параметр, например, объем, который будет определять толщину и цвет линии, либо для всех продуктов вместе, либо для одного выбранного продукта.

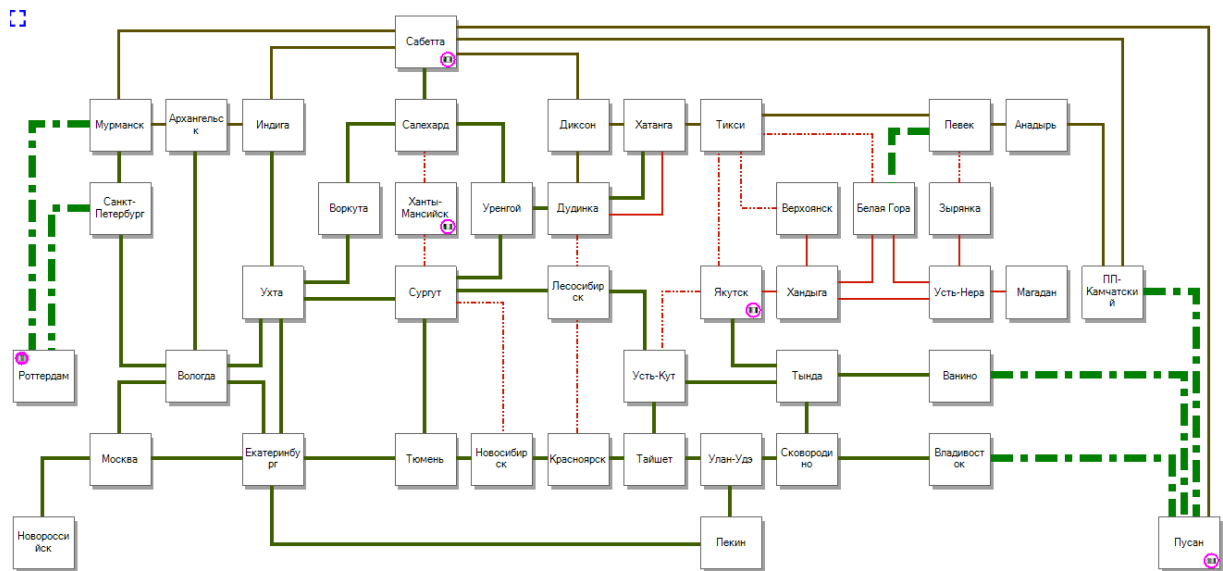


Рис. 2. Пространственное отображение пропускной способности плеч

Пример подобного отображения приведён на рис. 2, где в качестве отображаемого параметра плеча выбрана его пропускная способность. Зелёный цвет означает большую пропускную способность, серый – нейтральную, а красный – малую.

Естественно, пространственное отображение не является единственно возможным. Иногда полезным оказывается обычное табличное представление, особенно, если его дополнить упорядочением строк, соответствующих транспортным коридорам, типичными примерами которых являются Северный морской путь (СМП) или Транссибирская магистраль. Следует отметить, что понятие транспортного коридора может возникать не только априорно. Оно может появиться в зависимости от конкретного способа перевозки, выбранного в данном решении транспортной задачи для данного продукта. Причем в этот момент может изменяться и ориентация плеч: по одному и тому же плечу уголь везут в одну сторону, а контейнеры – в другую. Кроме того, клетки таблицы могут быть раскрашены теми же цветами, что и дороги на карте.

Плечо	Вид транс	Средний объём	Объём	Сред. цена за 1км.	Цена за 1км.	Сред. загрузка	Загрузка	Зависим. от Новосиб. - Краснояр.
Дудинка-Песосибир...	Река	2.22	2.00	1.44	1.30	0.22	0.20	0.58
Сургут-Новосибирск	Река	6.72	2.00	3.44	1.20	0.67	0.20	-0.55
Хандыга-Верхоянск	Авто	2.00	2.00	5.00	5.00	0.20	0.20	
Якутск-Усть-Кут	Река	2.00	2.00	3.00	3.00	0.20	0.20	
Мурманск-Роттердам	Море	3.22	3.00	0.64	0.60	0.03	0.03	0.58
ПП-Камчатский-Пус...	Море	3.00	3.00	0.60	0.60	0.03	0.03	
Усть-Нера-Белая Го...	Авто	4.00	4.00	9.00	9.00	0.40	0.40	
Мурманск-Сабетта	Лед	4.22	4.00	1.27	1.20	0.11	0.10	0.58
Хатанга-Тикси	Лед	5.00	5.00	13.00	13.00	0.13	0.13	
Ханты-Мансийск-Са...	Река	5.00	5.00	2.48	2.48	0.50	0.50	
Сургут-Ханты-Манси...	Река	6.00	6.00	3.00	3.00	0.60	0.60	
Дудинка-Хатанга	Авто	6.00	6.00	16.00	16.00	0.60	0.60	
Хандыга-Усть-Нера	Авто	6.00	6.00	10.50	10.50	0.60	0.60	
Диксон-Сабетта	Лед	6.00	6.00	17.00	17.00	0.15	0.15	

Рис. 3. Табличное представление решения

Следующий вопрос, который возникает в задаче типа «что-если», – сравнение двух решений. Предположим, что определён некоторый базовый вариант транспортной сети, для которого было получено решение, и теперь исследователь хочет выяснить, что будет, например, если повысить в два раза пропускную способность по Транссибу или снизить на 15 % тариф

перевозки по СМП. Для этого необходимо просчитать данную ситуацию и сравнить её с базовым решением. Мы опробовали несколько способов сравнения двух решений: от простого табличного представления до пространственно-анимационного, при котором отображение на карте одного решения плавно сменяется на другое, и обратно. Это позволяет «мгновенно» оценить места, в которых решения различаются, и определить степень отличия.

3. Моделирование типа «как-чтобы»

Зачастую, с точки зрения эксперта, ответ на вопрос «что-если» носит вспомогательный характер. На самом деле его интересует некоторая цель и значения параметров транспортной сети, при которых эта цель достигается. При этом часто как сама цель, так и, возможно, изменяемые параметры локальны. Примерами вопросов, соответствующих таким целям, являются следующие:

- При каких тарифах данное плечо будет загружено по крайней мере на 25 %?
- Насколько имеет смысл увеличивать пропускную способность данного транспортного коридора?

Подобного рода задачи можно исследовать путём проведения множества экспериментов, отслеживая, как изменяется решение в зависимости от варьируемых параметров. Опять же, процесс этот трудоёмкий и ненадёжный, поскольку зависимость объёмов перевозки от тарифов и пропускной способности при их одновременном изменении не является линейной, она даже не непрерывна. Например, если тариф перевозки по плечу превосходит некоторое значение, то грузопоток может полностью переключиться на другое плечо.

Для автоматизации этих исследований мы используем стохастический подход следующим образом:

- эксперт выбирает «ключевые» узлы или плечи транспортной сети и задаёт для них интервалы варьируемых параметров – тарифов обработки или пропускную способность;
- кроме этого, эксперт указывает количество вариантов, которые нужно просчитать;
- система генерирует и рассчитывает указанное количество вариантов, равномерно распределяя значения варьируемых параметров в указанных интервалах;
- эксперт исследует результаты расчётов с помощью предоставляемых системой визуальных средств и методов статистического анализа.

Естественным расширением пространственной визуализации единичного эксперимента является отображение не конкретных объёмов перевозки и загруженности, а некоторых статистических данных, собранных по всему множеству проведённых экспериментов, например, средних значений.

Пусть s – некоторое решение. Тогда набор статистических характеристик, которые поддерживает система МИКС-ПРОСТОР, можно записать в следующем виде.

- Средний объём продуктов, перевозимых по плечу (t, r, r') :

$$\text{avg}_s \sum_p [W_{trr'}^p]^s.$$

- Средняя суммарная цена продуктов, перевозимых по данному плечу, в пересчете на один км:

$$\text{avg}_s \sum_p [\varphi_{trr'}^p \cdot W_{trr'}^p]^s.$$

- Средняя загруженность плеча как среднее отношение объёмов, перевозимых по плечу, к его пропускной способности:

$$\text{avg}_s \frac{\sum_p [W_{trr'}^p]^s}{[P_{trr'}]^s}.$$

Для каждой характеристики, кроме собственно значения, определяющего толщину линии, можно определить границы изменения цвета линии. Например, большая загруженность представляется красными линиями, а малая – синими (рис. 4).

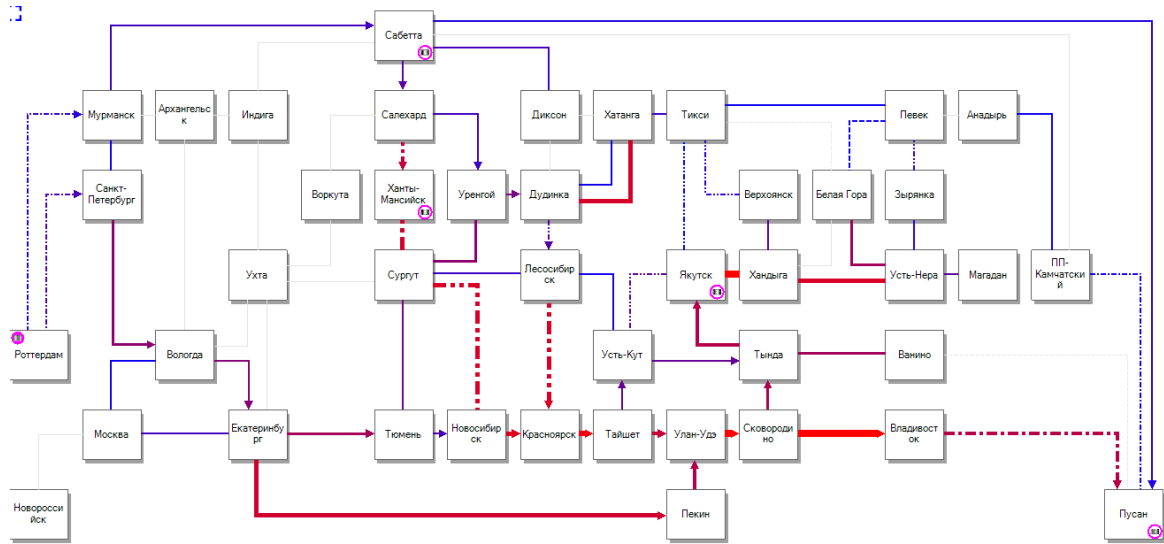


Рис. 4. Средняя загруженность плеч

Кроме перечисленных статистических характеристик, система предоставляет возможность отобразить процент решений, в которых данное плечо используется для перевозки данного продукта. На рис. 5 показан процент использования плеч для контейнеров из Роттердама. Серым цветом окрашены плечи, которые используются в большем количестве решений, а красным – в меньшем.

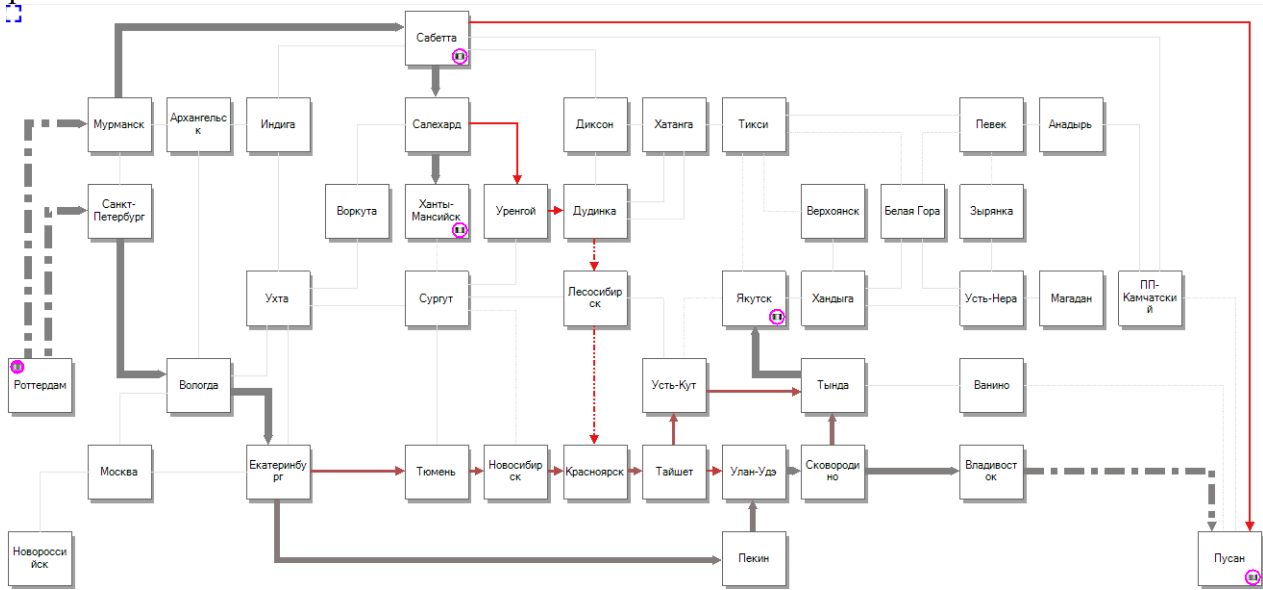


Рис. 5. Пространственное отображение процента использования плеч

Таким же образом можно отобразить и другие статистические характеристики, например, зависимость объема перевозки по плечу от данного варьируемого параметра. Если варьируемым параметром является, скажем, тариф перевозки данного продукта по конкретному плечу, то интересующая нас зависимость может быть вычислена как линейный коэффициент корреляции Пирсона [8]:

$$\frac{\sum_s ([X]^s - \bar{X})([Y]^s - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_s ([X]^s - \bar{X})^2 \sum_s ([Y]^s - \bar{Y})^2}}$$

Здесь $\bar{X} = \text{avg}_s [X]^s$, $\bar{Y} = \text{avg}_s [Y]^s$, а в качестве $[X]^s$ и $[Y]^s$ выступают значения $[\varphi_{trr'}^p]^s$ и $[W_{trr'}^p]^s$ соответственно.

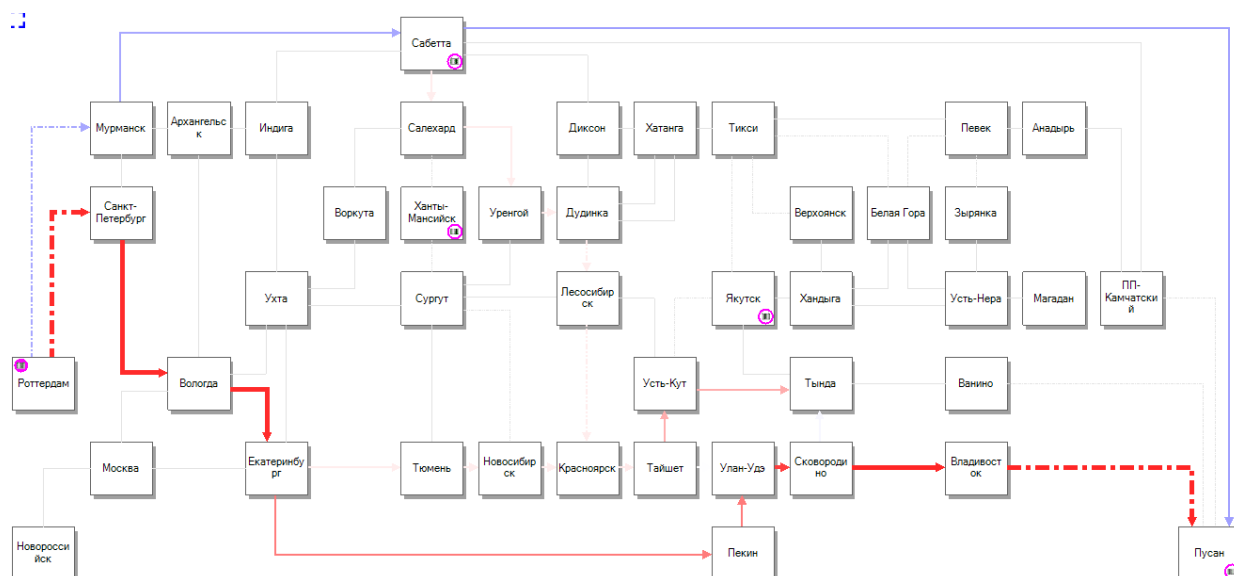


Рис. 6. Пространственное отображение корреляции

Таким образом, пользователь сразу получает представление о том, на что влияет данный параметр. На рис. 6 приведёт пример такого отображения – зависимость объёма перевозки от тарифа по плечу «Сабетта – Пусан» для контейнеров из Роттердама. Положительная корреляция представлена красными линиями, а отрицательная – синими. На основе анализа данного представления можно сделать неочевидные выводы о том, что объём перевозок контейнеров по железной дороге «Усть-Кут – Тында» возрастает при повышении варьируемого тарифа, а, например, плечо «Тында – Ванино» от этого тарифа существенно не зависит.

Рассматривая объёмы перевозки по плечам как характеристики конкретного решения, можно ставить вопрос о схожести вариантов и, следовательно, ставить задачу кластеризации множества рассчитанных вариантов. Вопрос о качестве кластеризации и выборе наиболее подходящего метода – тема отдельного исследования.

Имея разбиение множества вариантов решений на кластеры, можно выделить их наиболее типичных представителей, а также показать частотные характеристики распределения значений варьируемых параметров в каждом кластере. Пример такого отображения представлен на рис. 7, из которого видно, что для выделенного кластера характерно малое значение по первым двум варьируемым параметрам.

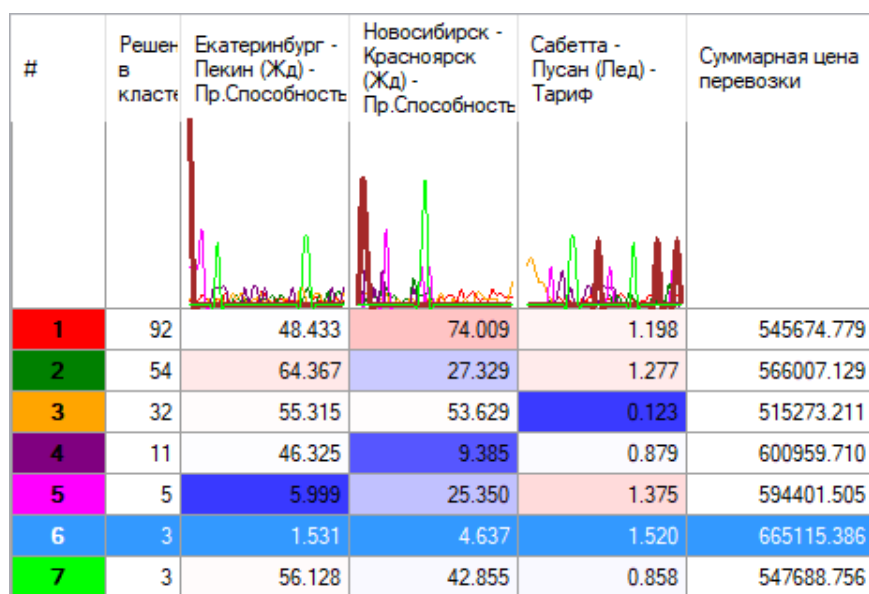


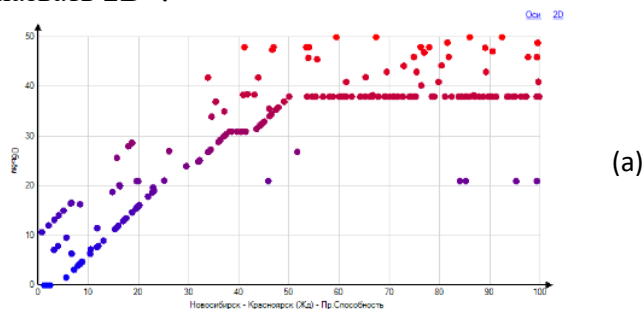
Рис. 7. Кластеризация множества решений

Транспонирование характеристической матрицы позволяет вычислять корреляцию не между вариантами решений, а между плечами. Знание этой корреляции даёт возможность выделения транспортных коридоров, которые представляют собой некоторую совокупность плеч с определённой степенью вероятности либо одновременно задействованных, либо одновременно не задействованных в перевозке. Следует отметить, что для разных продуктов коридоры могут отличаться. Если в матрице корреляции раскрасить клетки, варьируя цвет от красного (для положительной корреляции) до синего (для отрицательной корреляции), а затем переставить строки и столбцы матрицы так, чтобы красный цвет сосредоточился около главной диагонали, то возникающие красные блоки и будут означать транспортные коридоры. Пример такого отображения показан на рис. 8.

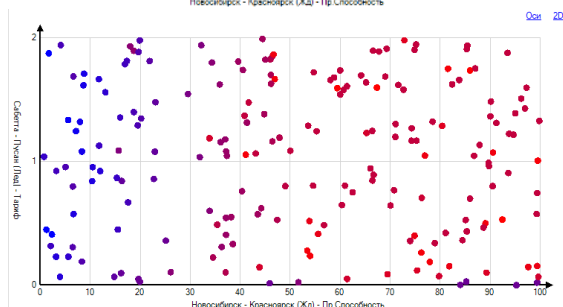


Рис. 8. Корреляция плеч – транспортные коридоры

Если варьируемых параметров несколько, то естественным образом возникает необходимость многомерной визуализации. Пусть, например, эксперт одновременно меняет тарифы для двух плеч. Отдельно 2D-графики зависимости объёма перевозки по некоторому третьему плечу могут не давать адекватного полного представления (рис. 9а и 9б). Оставаясь в двумерном пространстве, мы можем отображать объём цветом и размером точек на плоскости, каждая из которых соответствует конкретному варианту, как показано на рис. 9в. Такой способ визуализации можно назвать 2D+.



(а)



(б)

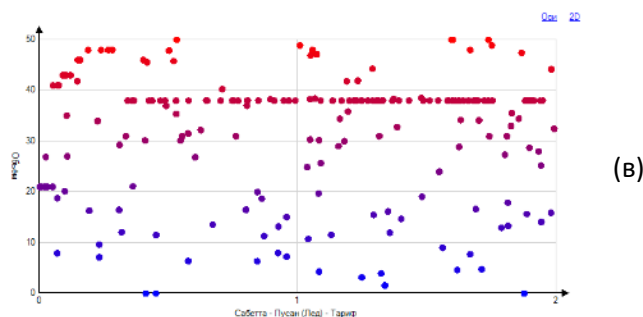


Рис. 9. Двумерная визуализация

Возможна также и 3D-, и 3D+-визуализация, причём осям могут соответствовать как значения варьируемых параметров, так и любые вычисляемые числовые величины, а отображение отдельных точек не обязательно должно напрямую определяться перевозимым объёмом. Так, на рис. 10 осям соответствуют два варьируемых параметра и суммарная стоимость перевозки, а цвет точки определяется цветом кластера, к которому отнесён данный вариант. Естественно, что в трёхмерном случае необходима возможность вращать изображение в пространстве.

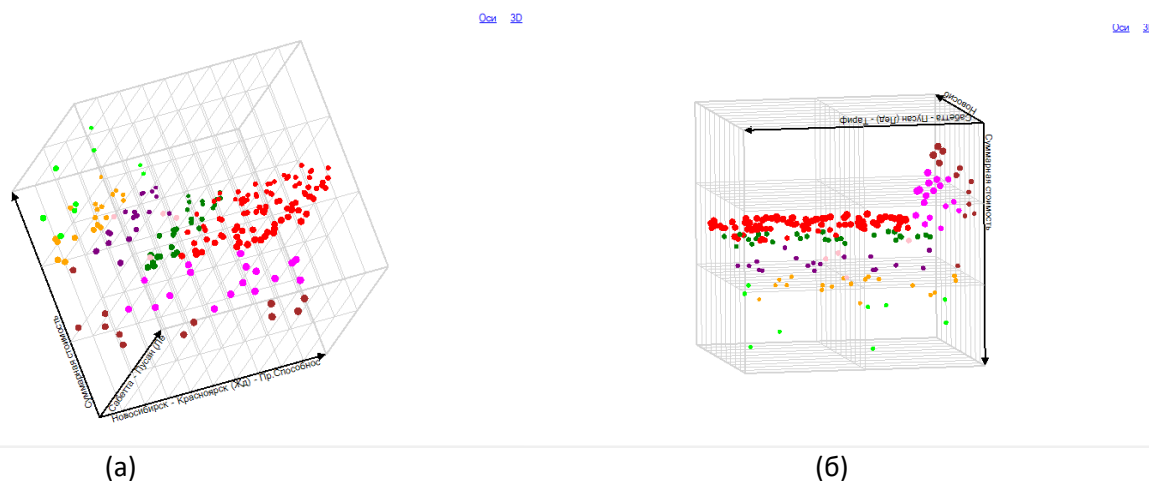


Рис. 10. Трёхмерная визуализация

На этом примере (рис. 10б) становится очевидным предположение, что разбиение на кластеры при достаточно больших значениях тарифа «Сабетта – Пусан» (горизонтальная ось) в основном связано с суммарной стоимостью перевозки (вертикальная ось), а при малых – со значением этого тарифа.

Заключение

Мы рассмотрели средства автоматизации прогнозирования развития опорной транспортной сети, предоставляемые системой МИКС-ПРОСТОР. Можно заметить, что по мере развития системы разработка новых средств визуализации позволяет не столько облегчить восприятие исследователем/экспертом полученного решения, сколько осознать и сформулировать запросы на новые средства анализа, которые, в свою очередь, требуют новых средств визуализации и т.д.

Литература

1. Бульонков М. А., Карпан В. В., Малов В. Ю., Марусин В. В., Радченко В. В. Концептуальные вопросы построения Модельно-Информационно-Картографической Системы (МИКС) //

- Моделирование производственных и региональных систем на основе ГИС и информационных технологий: сб. науч. тр. Новосибирск: ИЭОПП СО РАН, 2011. С. 5–28.
2. Бульонков М. А., Филаткина Н. Н. Ситуационный анализ в системе транспортного прогнозирования МИКС-ПРОСТОР // Информационные технологии. 2013. № 8. С. 43–52.
 3. Воробьёва В. В., Малов В. Ю., Радченко В. В., Поттер М. В., Серебрянников И. Е. Модель прогнозирования развития опорной транспортной сети // Моделирование производственных и региональных систем на основе ГИС и информационных технологий: сб. науч. тр. Новосибирск: ИЭОПП СО РАН, 2011. С. 68–96.
 4. Гранберг А. Г. Оптимизация территориальных пропорций народного хозяйства. М.: Экономика, 1973.
 5. Азиатская часть России: моделирование экономического развития в контексте опыта истории / под ред. В. А. Ламина, В. Ю. Малова. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2012. 463 с.
 6. Забиняко Г. И. Пакет программ целочисленного линейного программирования // Дискретный анализ и исследование операций. Сер. 2. 1999. Т. 6, № 2. С. 32–41.
 7. Google OR-Tools [Электронный ресурс]. URL: <https://developers.google.com/optimization/> (дата обращения: 22.03.2019).
 8. Гмурман В. Е. Теория вероятностей и математическая статистика: учебное пособие для вузов. 10-е издание, стереотипное. М.: Высшая школа, 2004. 479 с.

*Статья поступила в редакцию 31.07.2019;
переработанный вариант – 30.08.2019.*

Бульонков Михаил Алексеевич

к.ф.-м.н., доцент кафедры программирования НГУ, зав. лаб. смешанных вычислений ИСИ СО РАН, тел. (383) 330-93-44, e-mail: mike@iis.nsk.su.

Нестеренко Татьяна Викторовна

доцент кафедры систем информатики НГУ, н.с. ИСИ СО РАН (630090, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 6), e-mail: nest@iis.nsk.su.

Research automation of the transport network development

M. Bulyonkov, T. Nesterenko

A research automation system of forecasting the development of a basic transport network in Russia is considered. A formal model of the transport network allows various types of transport, products, production and consumption, and the task is to minimize the total cost of transportation with respect to a set of linear restrictions. The system provides a user interface for setting and editing all parameters of the transport network. Particular attention is paid to the visual and interactive presentation of simulation results. A holistic perception of the results is achieved by displaying both the input data (mode of transport, throughput, transportation cost) and the modeling results (transported volume and functioning capacity) directly either on the map or on the network plan. The system allows us to display either a selected product or all products together. In practice, it is often required to solve the problem that is inverse to simulation, for example, to find out at what tariffs the volumes of transportation over a certain transportation shoulder will exceed a given value. To do this, it is proposed to use stochastic methods based on the mass solution of the transport problem for a variety of network parameters, such as the capacity of the transport shoulder, the tariff for transportation of cargo or its processing in the transport hub. Clustering methods make it possible to distinguish a relatively small number of “typical” solutions from the entire set of variants. This enables the expert to evaluate both the conditions and the probability of the predicted transport situation. It is also shown that this approach allows us to identify automatically emerging transport corridors and determine the dependence of the volume of transportation on a given shoulder from a specific variable parameter.

Keywords: transportation problem, modeling, research automation system.