Моделирование и анализ информационных систем. Т. 23, №4 (2016), с. 412–426
Modeling and Analysis of Information Systems. Vol. 23, No 4 (2016), pp. 412–426

©Величко А. С., Грибова В. В., Федорищев Л. А., 2016

DOI: 10.18255/1818-1015-2016-4-412-426

УДК 519.8, 004.92

Облачный сервис для интерактивного моделирования межтерриториальной торговли

Величко А. С., Грибова В. В., Федорищев Л. А.

получена 14 апреля 2016

Аннотация. В работе описана математическая модель торговых потоков между территориями региона или страны в транспортной сети, представленной одним агрегированным или разнообразными видами морского и наземного транспорта. Используется подход моделирования сложных коммуникационных систем для определения наиболее вероятных значений потоков в условиях неполноты информации о рассматриваемой системе. Транспортные издержки между территориями моделируются в рамках гравитационной модели. Плата за перевозку зависит от расстояния между регионами, оцениваемого как длина кратчайшего пути между пунктами в заданной транспортной сети или определяемого как географическое расстояние. Математическая постановка задачи относится к классу выпуклых задач математического программирования и предполагает численное решение нелинейной оптимизационной задачи с линейными ограничениями. На основе модели реализовано программное средство как облачный сервис на гетерогенных вычислительных архитектурах: модуль моделирования выполнен на высокопроизводительной серверной платформе, модули управления и визуализации – на облачной платформе IACPaaS. Связь между платформами осуществляется через асинхронные http-запросы. Для обмена информацией между модулями разработана и реализована декларативная модель в формате JSON для объектов, рассматриваемых в математической модели: продуктов, зон и коммуникаций. Модуль визуализации позволяет наглядно представить исходные и получаемые в результате моделирования матричные данные, интерактивно изменять входные параметры модели. В работе продемонстрировано использование программного комплекса для моделирования межрегиональных грузопотоков в транспортной сети регионов Дальнего Востока России на основе входных данных, взятых из открытых статистических источников.

Ключевые слова: межрегиональный, транспорт, сеть, мультимодальный, гравитационный, энтропийный, равновесие, модель

Для цитирования: Величко А. С., Грибова В. В., Федорищев Л. А., "Облачный сервис для интерактивного моделирования межтерриториальной торговли", *Моделирование и анализ информационных систем*, **23**:4 (2016), 412–426.

Об авторах:
Величко Андрей Сергеевич, orcid.org/0000-0001-8760-316X, канд. физ.-мат. наук, научный сотрудник,
Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН
ул. Радио, 5, г. Владивосток, 690041 Россия, e-mail: vandre@dvo.ru

Грибова Валерия Викторовна, orcid.org/0000-0001-9393-351X, д-р техн. наук, зав. лабораторией,
Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН
ул. Радио, 5, г. Владивосток, 690041 Россия, e-mail: gribova@iacp.dvo.ru

Федорищев Леонид Александрович, orcid.org/0000-0002-2049-2570, канд. техн. наук, научный сотрудник,
Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН
ул. Радио, 5, г. Владивосток, 690041 Россия, e-mail: fleo1987@mail.ru

Благодарности:
Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ, №16-07-00340-а.

Введение

Работа транспортной системы, связывающей регионы страны, является необходимой для безопасного и устойчивого функционирования регионов как экономической системы, обеспечивающей процессы производства и потребления. Поскольку создание такой системы – трудоемкая задача, необходимым условием является предварительный анализ и оценка проектных и управленческих решений до их применения в реальных условиях. Такие решения могут быть направлены на модернизацию и строительство отдельных участков транспортной сети региона, прежде всего на подходах к портам, крупным промышленным районам, крупным городским агломерациям и новым месторождениям.

Транспортные системы в современных условиях характеризуются независимым некооперативным поведением большого количества разнородных экономических субъектов, реализующих свои индивидуальные интересы, совместно использующих сеть автомобильного, воздушного, трубопроводного, морского, железнодорожного транспорта как для грузовых, так и для пассажирских перевозок.

Моделирование межрегиональных потоков в межотраслевой постановке рассматривалось В. В. Леонтьевым [1], с точки зрения общего экономического равновесия и «гравитационного» подхода – в работе [2]. В работах [3, 4] моделировались коммуникационные системы в условиях неполноты информации. В настоящее время эти подходы активно используются для моделирования пассажиро- и грузопотоков в транспортных системах как в России, так и за рубежом [5–10]. Однако в построении математической модели торговых потоков наблюдаются следующие недостатки: не учитываются экспортные и импортные потоки за пределы системы рассматриваемых регионов; перевозки могут быть как многопродуктовыми, так и мультимодальными, то есть могут осуществляться по разным путям и/или различными видами транспорта: по автомобильным дорогам, железнодорожным, морским и авиационным видами транспорта; пункты ввоза и вывоза, моделируемые процессами спроса и предложения товаров, могут быть отнесены не только к одинаковым, но и к различным регионам. Помимо этого входные данные могут быть заданы неточно, в этом случае возможна модификация модели с интервальным заданием входных данных, что обсуждалось в статье [11]. Не менее важной задачей для использования моделей в практической деятельности является создание интерактивных систем моделирования со средствами визуализации полученных результатов в удобном для пользователя виде, прежде всего в виде графов.

Целью данной работы является описание программного комплекса, реализованного на гетерогенных вычислительных архитектурах, для интерактивного моделирования межтерриториальной торговли.

1. Требования к программному комплексу и основные принципы его реализации

Моделирование экономических связей территорий используется при принятии решений о региональной социально-экономической политике, направленной на снижение негативных проявлений межрегиональной неоднородности, в целях предот-

вращения образования депрессивных, неконкурентоспособных, бедствующих территорий, отстающих от регионов-лидеров, и в целом – в целях интеграции регионов страны.

Программное средство моделирования межтерриториальной торговли предназначено для специалистов различных министерств и ведомств, занимающихся проблемой оптимизации и планирования межтерриториальных потоков продуктов отраслей экономики с учетом их многопродуктовости в многомодальных транспортных сетях.

Основными требованиями к программному комплексу являются:

1. Реализация комплекса как облачного сервиса для обеспечения как можно более широкой доступности разрабатываемого приложения для заинтересованного сообщества. Использование приложения как облачного сервиса не накладывает дополнительных ограничений на платформу, установленную на компьютере клиента, оперативную память, другие характеристики компьютера, а также не требует навыков инсталляции приложения [12, 13].

2. Возможность в реальном режиме времени моделировать торговые потоки. Учитывая, что моделирование торговых потоков требует больших вычислительных ресурсов, блок моделирования должен быть реализован на высокопроизводительных вычислительных платформах для обеспечения эффекта «реального времени» во время процесса моделирования.

3. Система должна иметь средства ввода исходных данных и визуализации результатов моделирования в удобном для пользователя виде.

Учитывая ключевые требования к программному комплексу, в качестве средства реализации системы визуализации и интерактивного моделирования выбрана облачная платформа IACPaaS [14], которая представляет собой программно-информационный интернет-комплекс для обеспечения поддержки разработки, управления и удаленного использования прикладных и инструментальных мультиагентных облачных сервисов и их компонентов. Для реализации блока моделирования используется высокопроизводительный вычислительный кластер. Связь между платформой IACPaaS и вычислительным кластером осуществляется через асинхронные http-запросы.

На рисунке 1 представлена обобщенная архитектура облачного сервиса. В общем случае сервис моделирования состоит из трех основных модулей: модуля моделирования торговых потоков, модуля управления и модуля визуализации.

2. Модуль моделирования торговых потоков

В данном разделе представлена математическая модель торговых потоков и ее программная реализация.

2.1. Математическая модель торговых потоков

Рассмотрим модель экономики k регионов, в каждом из которой имеется n продуктов. Пусть z_{ij}^{rm} – неизвестное, моделируемое количество продукта r-го типа, $r = 1, ..., n$, поставляемого из i-го региона в j-й, $i, j = 1, ..., k$, перевозимое видом

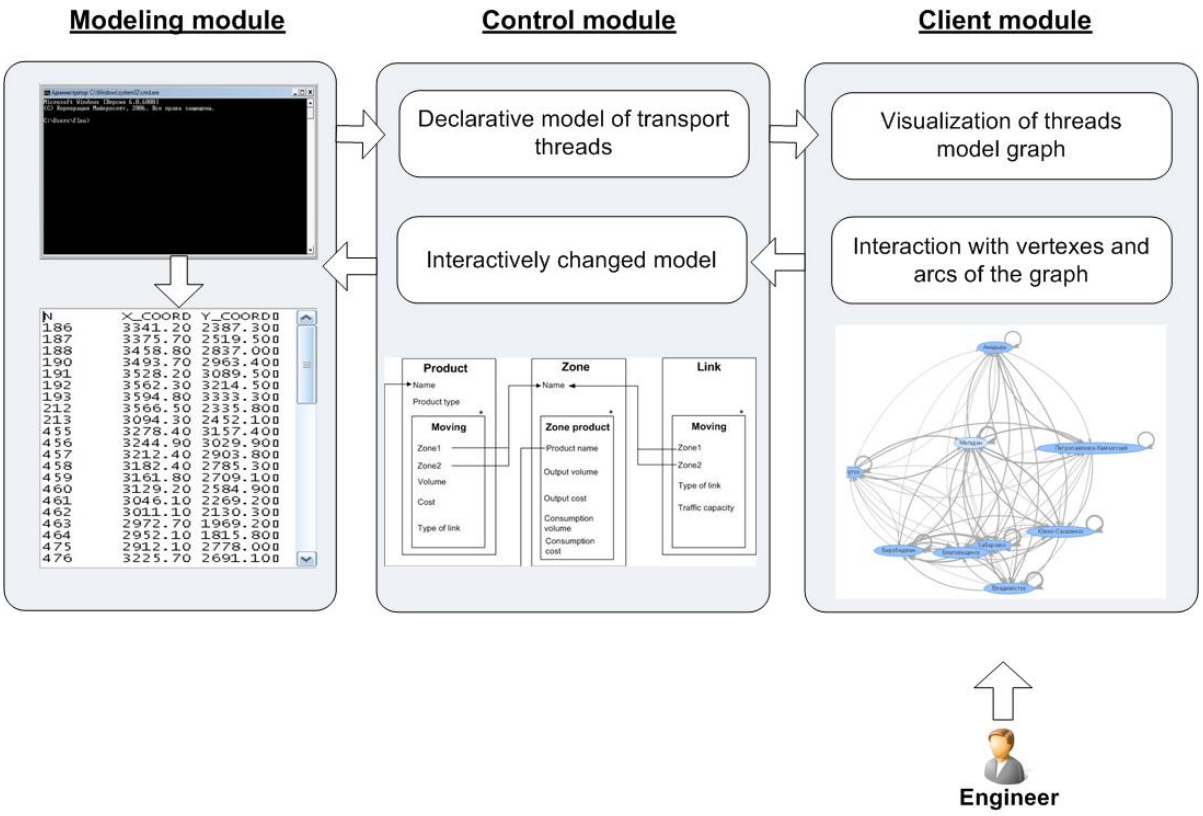

Рис. 1. Архитектура взаимодействия программных модулей сервиса интерактивного моделирования торговых потоков

Fig. 1. Interaction architecture of software modules for interactive trade flows service

транспорта $m = 1, 2, ..., M$, где M – количество различных типов транспорта, используемых для перевозок. Здесь и далее верхние индексы соответствуют типам продукта и виду транспорта, нижние – регионам. Заметим, что поток z_{ii}^{rm} не обязательно предполагается равным нулю, что соответствует потреблению регионом продукта, перевозка которого не осуществляется.

Суммарный поток продукта r в j-й регион («полное потребление» продукта r в регионе j) различными видами транспорта неизвестен и равен $\sum\limits_{m=1}^{M}\sum\limits_{i=1}^{k} z_{ij}^{rm}$, что равно V_j^r – известному совокупному ввозу продукта r в регион j. Суммарный вывоз продукта r из региона i в остальные регионы («полное производство» продукта r в регионе i) с использованием всех видов транспорта равен $\sum\limits_{m=1}^{M}\sum\limits_{j=1}^{k} z_{ij}^{rm}$, что в свою очередь является известной из статистических данных величиной W_i^r.

Определяемое таким образом производство и потребление для каждого продукта $r = 1, ..., n$ подчиняется очевидному для замкнутой системы уравнению баланса $\sum\limits_{m=1}^{M}\sum\limits_{i=1}^{k}\sum\limits_{j=1}^{k} z_{ij}^{rm} = \sum\limits_{i} V_j^r = \sum\limits_{j} W_i^r$, что накладывает дополнительное ограничение на величины V_j^r и W_i^r.

Однако, поскольку система регионов не замкнута, то указанный выше баланс,

формируемый на основе статистических данных, не будет соблюдаться. Это означает, что существуют потоки продуктов между рассматриваемыми k регионами и некоторыми в общем случае неизвестными, «внешними» регионами по отношению к рассматриваемой системе. Задача осложнятся тем, что и суммарный ввоз, и вывоз для таких «внешних» регионов являются неизвестными. Очевидно, что модель в этом случае требует модификации.

Для решения этой проблемы агрегируем подобные «внешние» регионы в регион $k+1$ и будем рассматривать дополнительные неизвестные потоки $z^{rm}_{i\,k+1}$ и $z^{rm}_{k+1\,j}$.

Торговые потоки осуществляются экономическими агентами под воздействием платы за перевозку, которая во многом зависит от географического расстояния между регионами. Рассмотрим гравитационную модель транспортных издержек, которая может быть представлена соотношением $v^{rm}_{ij} = exp(-d^{rm}T_{ij})$, где v^{rm}_{ij} – априорно заданный поток продуктов из i-го региона в j-й, T_{ij} – оценка географического расстояния между регионами i и j, а d^{rm} – параметры, отвечающие за чувствительность потока к расстоянию для данного продукта и вида используемого транспорта для его перевозки. Параметры d^{rm} неотрицательны, что означает меньшую величину потока между регионами i и j при большем значении расстояния между ними. В данном случае предполагается, что $v^{rm}_{ii} = 0$ и $T_{ii} = 0$ и $v^{rm}_{ij} = v^{rm}_{ji}$.

Калибровка неотрицательных параметров d^{rm} на фактических статистических данных представляет собой отдельную задачу прикладной статистики. Такая оценка проводится методами, применяемыми к модели регрессии, которая представима линейной по параметрам моделью $\ln v^{rm}_{ij} = \alpha - d^{rm}T_{ij} + \delta^{rm}$ для всех $i, j = 1, ..., k$ и $i > j$, где δ^{rm} – нормально распределенные остатки регрессий для всех r и m.

В работах [3, 4, 10] рассматривается подход моделирования потоков в коммуникационной сети, соответствующий принципу наиболее вероятного значения распределения потоков системы в условиях неполноты информации, когда заданы лишь балансовые соотношения на потоки. Адаптация данного подхода для рассматриваемой нами модели торговых межрегиональных потоков приводит к необходимости минимизации нелинейной функции вида $\sum\limits_{i,j=1,i\neq j}^{k+1} z^r_{ij}\ln(z^{rm}_{ij}/\nu^{rm}_{ij})$ по совокупности неизвестных потоков z^{rm}_{ij}.

Наличие такой функции приводит к необходимости задания строго положительных торговых потоков z^{rm}_{ij}, что моделируется заданием для потоков ограничений снизу малым наперед заданным параметром $\varepsilon > 0$.

Таким образом, для моделирования торговых потоков необходимо решать оптимизационную задачу с нелинейной целевой функцией и линейными ограничениями:

$$\sum_{i,j=1,i\neq j}^{k+1} z^r_{ij}\ln(z^{rm}_{ij}/\nu^{rm}_{ij}) \to \min_{\{z^{rm}_{ij}\}},$$

где $v^{rm}_{ij} = exp(-\hat{d}^{rm}T_{ij})$, $\hat{d}^{rm}$ – известные оценки параметров и ограничения задачи имеют вид

$\sum\limits_{m=1}^{M}\sum\limits_{i=1}^{k+1} z^{rm}_{ij} = V^r_j$ для всех $j = 1, 2, .., k$ и $r = 1, 2, .., n$,

$\sum\limits_{m=1}^{M}\sum\limits_{j=1}^{k+1} z^{rm}_{ij} = W^r_i$ для всех $i = 1, 2, .., k$ и $r = 1, 2, .., n$,

$z_{ij}^{rm} \geq \varepsilon > 0$ для всех $i, j = 1, 2, .., k+1$, $r = 1, 2, .., n$, $m = 1, 2, ..., M$.

2.2. Программная реализация математической модели торговых потоков

В соответствии с описанной математической моделью реализовано программное средство, реализующее описанную модель. Программа [16] предназначена для нахождения равновесных межрегиональных грузопотоков в транспортной сети системы регионов на основе вышеописанной математической модели. Ее реализация выполнена на языке MPL [17] и Octave [18] на серверной платформе SuperMicro SuperServer 6037R-72RFT+. Данное программное средство позволяет рассчитать равновесные значения объемов грузопотоков между узлами транспортной сети.

Для применения программы используется следующая входная информация: статистические данные по совокупному ввозу и вывозу продуктов для регионов, расстояния между основными транспортными узлами регионов при осуществлении перевозок железнодорожным, автомобильным и/или морским транспортом.

Результатом выполнения программы являются рассчитанные равновесные значения объемов грузопотоков между транспортными узлами транспортной сети, матрицы межрегиональных потоков и матрицы «связанности» регионов как в разрезе отдельных разделов ОКВЭД, так и в целом по всем моделируемым разделам ОКВЭД.

Показателем «связанности» регионов i и j по определенному виду продукции называется величина $L_{ij} = \frac{2(x_{ij}+x_{ji})}{E_i+E_j+I_i+I_j}$, где x_{ij} – торговый поток из региона i в регион j, E_i – суммарный вывоз продукции из региона i во все остальные регионы, E_j – аналогично определяемая величина для региона j. Величины I_i, I_j – суммарный ввоз продукции в регион i и j соответственно из всех остальных регионов.

Программа обеспечивает вывод матриц вычисленных межрегиональных потоков и матриц показателей коэффициентов связности регионов по каждому товару и в агрегатном представлении по всем товарам.

3. Модуль управления

Для обеспечения удобного анализа и интерактивной обработки полученных результатов математических вычислений необходимо выполнить визуализацию полученных результатов и предоставить пользователю интерфейс для интерактивного моделирования различных ситуаций. Модуль моделирования торговых потоков и модуль визуализации являются полностью независимыми и внешними по отношению друг к другу программными средствами, находящимися на разных серверах. Для объединения этих модулей необходима дополнительная программа-посредник – модуль управления взаимодействием независимых внешних модулей. Поэтому вычисленные с помощью модуля моделирования матрицы передаются в модуль управления, расположенный на облачной платформе IACPaaS.

Главная задача модуля управления – получать и передавать информацию от модуля моделирования и модуля визуализации в заранее определенном формате, понятном обеим сторонам взаимодействия. Формат данных, с которым «удобно»

работать модулю моделирования, – матричное представление; формат данных для визуализации – графовая структура. Оба эти формата являются узкоспециализированными и отражают специфику решаемых задач. Для обмена информацией между ними необходим промежуточный формат, который будет легко преобразовываться в специальный и наоборот. Для этой цели был разработан формат декларативной модели торговых потоков [19], состоящий из трех основных типов объектов: продукты, зоны и коммуникации. Структура каждого типа объекта и связи между ними представлены на рисунке 2.

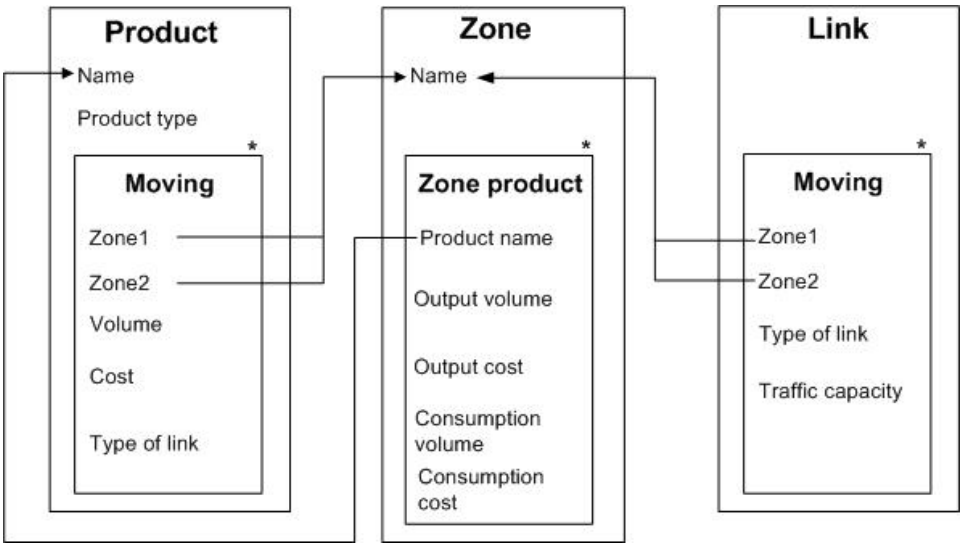

Рис. 2. Декларативная модель торговых потоков
Fig. 2. The declarative model of trade flows

Формальное представление объекта «Продукты» выглядит следующим образом.
Продукты: [
{ // *Продукт* <*i*>
Имя: <Строковое значение>,
Тип продукции отрасли: <Строковое значение>
Движение: [
{ // *Движение* <*i*>
Зона1: <Строковое значение>,
Зона2: <Строковое значение>,
Объем нагрузки: <Числовое значение>,
Стоимость: <Числовое значение>,
Тип коммуникации: <Качественное значение>
},
{},...
]
},
{},...
],

Модуль управления работает на основе стандартного http-протокола и асинхронных запросов. Модуль визуализации отправляет асинхронный http-запрос модулю управления на получение входных данных от модуля моделирования. Модуль управления инициирует http-запрос на получение или расчет данных о состоянии торговых потоков. Модуль моделирования (произведя необходимые расчеты, если необходимо) формирует необходимые данные в декларативном представлении в вышеуказанном формате и затем отправляет ответ модулю визуализации через модуль управления. По полученным данным модуль визуализации строит граф торговых потоков. В процессе работы с сервисом модуль визуализации может послать новые запросы, содержащие измененную информацию о модели на сервер модуля моделирования.

4. Модуль визуализации

Модуль визуализации позволяет наглядно (графически) представить сложные матричные данные о возможных торговых потоках в виде ориентированного графа, в котором дуги являются непосредственно торговыми потоками, а вершины представляют точки назначения этих потоков.

Визуализированная транспортная сеть позволяет пользователю не только увидеть результаты математического моделирования, но и интерактивно изменять их, меняя параметры вершин и дуг с помощью программного интерфейса.

Модуль визуализации позволяет отображать различные варианты ориентированного графа в зависимости от нужных параметров. Для этого на основе декларативной модели автоматически формируются элементы управления графом торговых потоков [20]. С помощью элементов управления пользователь может указать, какой товар и какой тип коммуникации необходимо отобразить в необходимой выборке. Параметрическая выборка и визуализация только части информации имеет большое значение для наглядности получаемых результатов, особенно если части этих результатов являются полностью (частично) независимыми друг от друга (рисунок 3).

В визуализации графа торговых потоков используются дополнительные графические параметры: цвет и толщина дуг. Цвет характеризует тип коммуникации потоков. Толщина дуг характеризует объем загруженности потоков.

Интерактивное редактирование графа предполагает изменение параметров как вершин графа (рисунок 4), так и его дуг. При нажатии на соответствующий элемент графа пользователь получает структурированную информацию об объекте, которую может изменить. В соответствии с внесенными изменениями на сервер модуля моделирования через модуль управления будет отправлен динамический асинхронный запрос, в результате которого будет получена новая декларативная модель торговых потоков, и визуализация графа изменится.

Реализация модуля визуализации как облачного сервиса открывает удобную возможность использования и демонстрации математических результатов моделирования для многих пользователей через Интернет.

Для использования сервиса достаточно зайти на облачную платформу и получить доступ на его использование у администратора без установки дополнительных

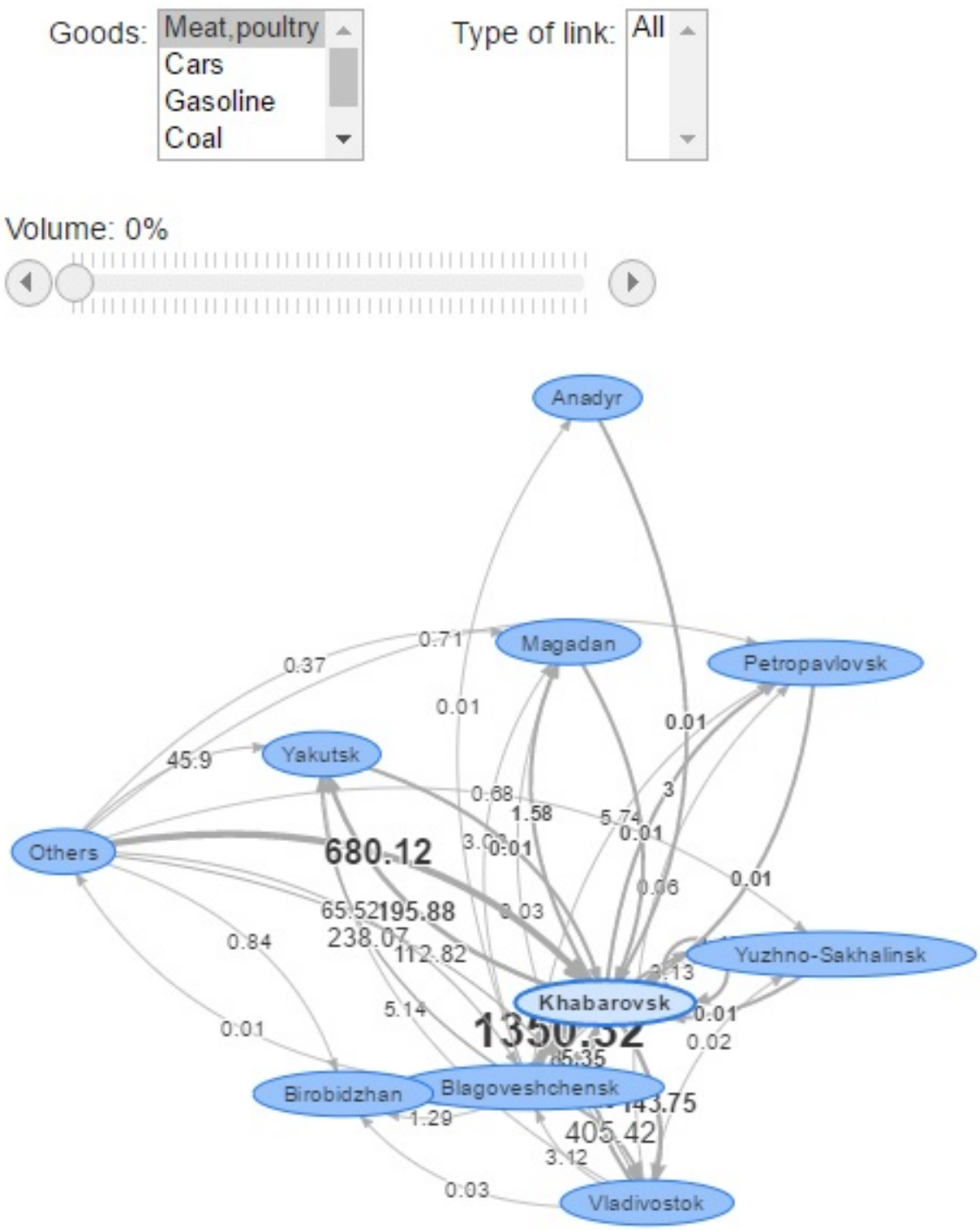

Рис. 3. Визуализация торговых потоков
Fig. 3. Visualization of trade flows

модулей на компьютере пользователя. Важно, что размещение сервиса на облачной платформе дает возможность пользоваться им на любом компьютере независимо от его местоположения.

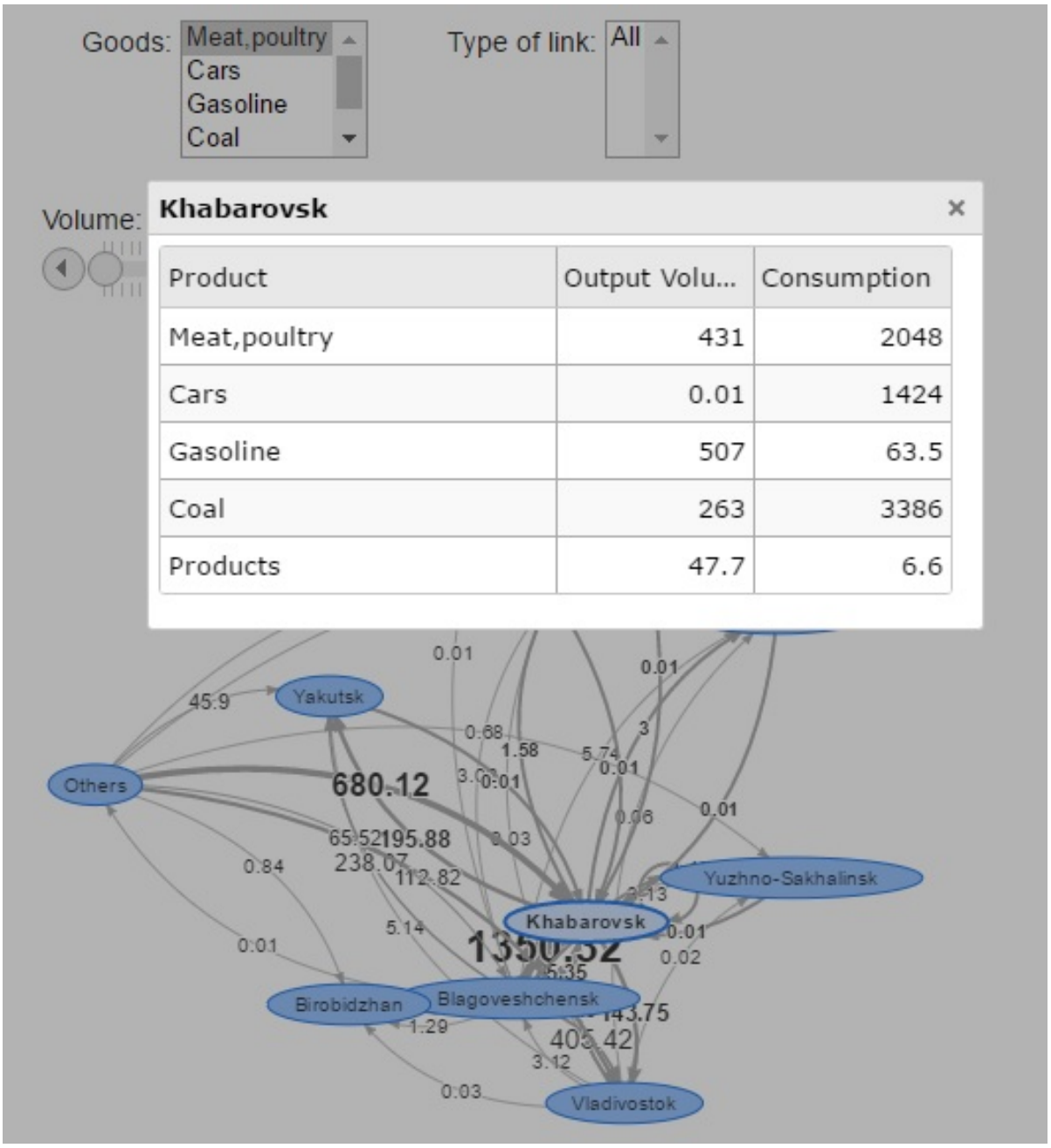

Рис. 4. Редактирование параметров модели
Fig. 4. Editing the parameters of the model

5. Визуализация и анализ решения

Программный комплекс для интерактивного моделирования межтерриториальной торговли применяется для определения равновесных межрегиональных грузопотоков в транспортной сети железнодорожного, автомобильного и морского транспорта регионов Дальнего Востока России. В качестве входных данных используется информация Росстата из официальных статистических справочников разных лет «Ре-

гионы России. Социально-экономические показатели» о межрегиональной торговле основными видами продукции (товаров): продовольственными товарами, топливом, товарами технического назначения и др.

В качестве пунктов ввоза и вывоза продукции рассматриваются административные центры 9 регионов Дальнего Востока: Приморский край (г. Владивосток), Хабаровский край (г. Хабаровск), Амурская область (г. Благовещенск), Еврейская автономная область (г. Биробиджан), Республика Саха - Якутия (г. Якутск), Магаданская область (г. Магадан), Сахалинская область (г. Южно-Сахалинск), Камчатский край (г. Петропавловск-Камчатский), Чукотский автономный округ (г. Анадырь). Оценки расстояний между регионами приведены в таблице 1, они соответствуют кратчайшим путям между административными центрами рассматриваемых регионов в транспортной сети железнодорожного, автомобильного и морского транспорта Дальнего Востока России.

Таблица 1. Оценки расстояний между регионами Дальнего Востока России, км
Table 1. Estimates of the distances between the regions of the Russian Far East, km

Регионы Regions	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0	762	1410	938	3314	2490	990	2490	4490
2	762	0	779	176	2552	2534	1034	2534	4534
3	1410	779	0	603	2035	3182	1813	3182	5182
4	938	176	603	0	2376	2710	1210	2710	4710
5	3314	2552	2035	2376	0	1736	3586	2736	4736
6	2490	2534	3182	2710	1736	0	1500	1000	3000
7	990	1034	1813	1210	3586	1500	0	1500	3500
8	2490	2534	3182	2710	2736	1000	1500	0	2000
9	4490	4534	5182	4710	4736	3000	3500	2000	0

Примечание:

Приморский край – 1, Хабаровский край – 2, Амурская область – 3, Еврейская автономная область – 4, Республика Саха (Якутия) – 5, Магаданская область – 6, Сахалинская область – 7, Камчатский край – 8, Чукотский автономный округ – 9.

В таблице 2 приведен результат моделирования перевозок угля, как решение задачи определения наиболее вероятных перевозок товаров в системе дальневосточных регионов и их торговли с другими регионами. Внешние по отношению к системе рассматриваемых регионов территории агрегированы в регион, который в таблице указан последней строкой (столбцом) под номером «10».

Таблица 2. Результаты моделирования. Перевозки угля, тыс. тонн
Table 2. The simulation results. Transportation of coal, thous. tons

Регионы Regions	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0	5,53	2,29	0,78	0,72	1,45	0	0,78	0,36	0
2	100,69	0	44,63	5,18	19,6	52,13	0	27,98	12,79	0
3	172,49	184,94	0	16,44	14,47	60,61	0	32,53	13,53	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	1133	1693,23	301,64	180,99	0	92,41	0,01	78,16	34,55	0,01
6	20,95	41,37	11,61	5,08	0,85	0	0	0,7	0,54	0
7	12,86	26,08	10,21	3,5	2,71	3,03	0	1,63	0,97	0
8	0	0,01	0	0	0	0	0	0	0	0
9	33,11	64,88	16,57	7,74	2,03	3,44	0	1,23	0	0
10	705,91	1369,96	306,05	157,29	41,03	109,91	0	58,99	15,06	0

Примечание:

Приморский край – 1, Хабаровский край – 2, Амурская область – 3, Еврейская автономная область – 4, Республика Саха (Якутия) – 5, Магаданская область – 6, Сахалинская область – 7, Камчатский край – 8, Чукотский автономный округ – 9, другие регионы – 10.

Визуальное представление данных таблицы 2 приведено на рисунке 5.

В настоящее время моделирование производится по 25 товарам различного назначения: продовольственные товары, топливо, товары технического назначения и другие. Результат моделирования определяет вероятные перевозки товаров между регионами Дальнего Востока России. В условиях неполноты статистических данных использование математического моделирования позволило получить интерпретируемые результаты, имеющие экономический смысл и прогноз наиболее вероятного распределения потоков товаров между регионами Дальнего Востока России.

Представленный подход позволяет выяснить характер взаимосвязей экономик регионов Дальнего Востока России в условиях существующей пространственной структуры размещения производств. Эти взаимосвязи сопровождаются пространственной неравномерностью и сильной дифференциацией по продуктам. Новая структура взаимосвязей экономик регионов возможна при изменении параметров экономического пространства (транспортная, энергетическая инфраструктура; пространственная структура производства и расходования валового регионального продукта).

6. Заключение

В работе описан программный комплекс, который предназначен для интерактивного моделирования межтерриториальной торговли. Сервис моделирования является облачным и состоит из трех основных модулей: модуля моделирования торговых потоков, модуля управления и модуля визуализации. В основе модуля моделирования торговых потоков лежит математическая модель торговых потоков. Учитывая

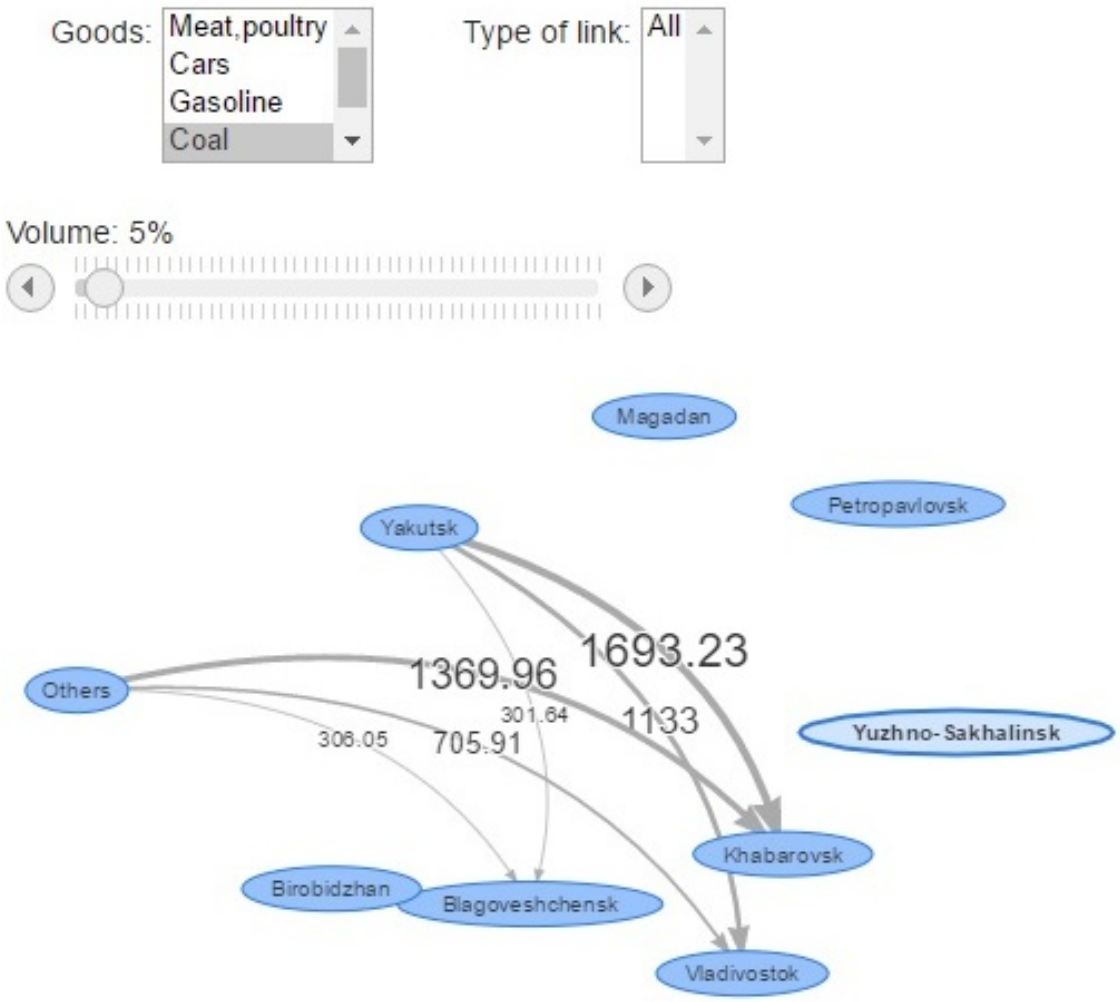

Рис. 5. Торговые потоки угля
Fig. 5. Trade flows of coal

большую вычислительную сложность процесса моделирования, модуль моделирования реализован на высокопроизводительной вычислительной архитектуре, модули управления и визуализации реализованы на облачной платформе IACPaaS с использованием мультиагентного подхода. Взаимодействие между вычислительным кластером и платформой IACPaaS осуществляется по http-протоколу на основе динамических асинхронных вызовов.

Программный комплекс предназначен для специалистов различных министерств и ведомств, занимающихся проблемой оптимизации и планирования межтерриториальных потоков продуктов отраслей экономики с учетом их многопродуктовости в многомодальных транспортных сетях, и может быть использован для моделирования межтерриториальной торговли в различных регионах России.

Список литературы / References

[1] Леонтьев В. В., *Избранные произведения в 3-х тт*, **1**, Общеэкономические проблемы межотраслевого анализа, Экономика, М., 2006; [Leont'ev V. V., *Izbrannye proizvedeniya v 3-kh tt*, **1**, Obshcheekonomicheskie problemy mezhotraslevogo analiza, Ekonomika, M., 2006, (in Russian).]

[2] Anderson J. E., Wincoop E., "Gravity with gravitas: a solution to the border puzzle", *The American Economic Review*, **93**:1 (2003), 170–192.

[3] Вильсон А. Дж., *Энтропийные методы моделирования сложных систем*, Наука, М., 1978; [Vil'son A. Dzh., *Entropiynye metody modelirovaniya slozhnykh sistem*, Nauka, M., 1978, (in Russian).]

[4] Fang S. C., Rajasekara J. R., Tsao H. S. J., *Entropy Optimization and Mathematical Programming*, Kluwer Academic, Dordrecht, 1997.

[5] Batten D. F., Boyce D. E., "Spatial interaction and interregional commodity flow models", *Handbook on regional and urban economics*, **1**, 1987, 357–406.

[6] Ham H., Kim T. J., Boyce D., "Implementation and estimation of a combined model of interregional, multimodal commodity shipments and transportation network flows", *Transportation Research. Part B*, 2005, № 39, 65–79.

[7] Ham H., Kim T. J., Boyce D., "Assessment of economic impacts from unexpected events with an interregional commodity flow and multimodal transportation network model", *Transportation Research. Part A*, 2005, № 39, 849–860.

[8] Васильева Е. М., Левит Б. Ю., Лившиц В. Н., *Нелинейные транспортные задачи на сетях*, Транспорт, М., 1981; [Vasil'eva E. M., Levit B. Yu., Livshits V. N., *Nelineynye transportnye zadachi na setyakh*, Transport, M., 1981, (in Russian).]

[9] Васильева Е. М., Игудин Р. В., Лившиц В. Н., *Оптимизация планирования и управления транспортными системами*, Транспорт, М., 1987; [Vasil'eva E. M., Igudin R. V., Livshits V. N., *Optimizatsiya planirovaniya i upravleniya transportnymi sistemami*, Transport, M., 1987, (in Russian).]

[10] Попков Ю. С. и др., *Системный анализ и проблемы развития городов*, Наука, М., 1983; [Popkov Yu. S. et al., *Sistemnyy analiz i problemy razvitiya gorodov*, Nauka, M., 1983, (in Russian).]

[11] Величко А. С., Давыдов Д. В., "Интервальная энтропийная модель межрегионального производственного баланса", *Пространственная экономика*, **3**:3 (2009), 20–35; [Velichko A. S., Davydov D. V., "Intervalnaya entropiynaya model mezhregionalnogo proizvodstvennogo balansa", *Prostranstvennaya ekonomika*, **3**:3 (2009), 20–35, (in Russian).]

[12] Zhang Q., Cheng L., Boutaba R., "Cloud computing: state-of-the-art and research challenges", *J. Internet Serv. Appl.*, **1** (2010), 7–18.

[13] Sun L. et al., "Cloud service selection: State-of-the-art and future research directions", *Journal of Network and Computer Applications*, **45** (2014), 134–150.

[14] Gribova V. et al., "A Cloud Computing Platform for Lifecycle Support of Intelligent Multi-agent Internet-services", International Conference on Power Electronics and Energy Engineering (PEEE) (Hong Kong, China, April 19–20, 2015), 231–235.

[15] Грибова В. В. и др., "Базовая технология разработки интеллектуальных сервисов на облачной платформе IACPaaS. Часть 1. Разработка базы знаний и решателя задач", *Программная инженерия*, **12** (2015), 3–11; [Gribova V. V. et al., "A Base Technology for Development of Intelligent Services with the Use of IACPaaS Cloud Platform. Part 1. A Development of Knowledge Base and Problem Solver", *Software Engineering*, **12** (2015), 3–11, (in Russian).]

[16] Величко А. С., "Вычисление равновесных межрегиональных потоков товаров в условиях интервальной неопределенности с использованием метода перекрестной энтропии", свидетельство о госрегистрации ПрЭВМ РФ №2011613757 от 13.05.11, *RU ОБПБТ*, **3(76)** (2011), 256–257; [Velichko A. S., "Vychislenie ravnovesnykh

mezhregionalnykh potokov tovarov v usloviyakh intervalnoy neopredelennosti s ispolzovaniem metoda perekrestnoy entropii", sv. o gos. reg. prog. dlya EVM Ross. Fed. №2011613757 ot 13.05.11, *RU OBPBT*, **3(76)** (2011), 256–257, (in Russian).]

[17] *AMPL: A Modeling Language for Mathematical Programming*, http://www.ampl.com.

[18] *GNU Octave: High-level language for numerical computations*, https://www.gnu.org/software/octave/.

[19] Gribova V. V. et al., "A Two-level Model of Information Units with Complex Structure that Correspond to the Questioning Metaphor", *Automatic Documentation and Mathematical Linguistics*, **49**:5 (2015), 172–181.

[20] Gribova V., Fedorischev L., "Cloud service for development of virtual interactive environments", International Conference on Advanced ICT for Education (ICAICTE) (Dalian, China, August 16–17, 2014), 20–23.

Velichko A. S., Gribova V. V., Fedorishchev L. A., "Cloud Service for Interactive Simulation of Interregional Trade", *Modeling and Analysis of Information Systems*, **23**:4 (2016), 412–426.

DOI: 10.18255/1818-1015-2016-4-412-426

Abstract. The paper describes a mathematical model of trade flows between the territories of a region or a country in a transport network having one or more different types of marine or ground transportation. We use the approach of modeling complex communication systems to determine the most probable values of flows in case of incomplete information about the system. Transport costs between the territories are modeled within the framework of the gravity model. The payment for transportation depends on the distance between regions, the distance is estimated as the shortest way length in a given transport network or geographical distance. The mathematical formulation of the problem belongs to the class of convex mathematical programming problems and assumes the numerical solution of nonlinear optimization problem with linear constraints. Based on the model, the software is implemented as a cloud service on heterogeneous computing architectures: the simulation module is made on a high-performance server platform, management and visualization modules are produced with IACPaaS cloud platform. Communication between the platforms is established via asynchronous http-queries. For information exchange between the modules the declarative model with JSON format is developed and implemented for the objects considered in the mathematical model which are products, areas and communications. Visualization module allows to present graphically the original and the resulting matrix data and to modify the input parameters of the model interactively. The paper demonstrates the use of software for the simulation of inter-regional freight traffic of the Russian Far East region based on input data provided by open statistics sources.

Keywords: interregional, transportation, network, multimodal, gravity, entropy, equilibrium, model

On the authors:
Velichko Andrei Sergeevich, orcid.org/0000-0001-8760-316X, PhD, researcher,
Institute for Automation and Control Processes FEB RAS,
5, Radio Str., Vladivostok, 690041, Russia, e-mail: vandre@dvo.ru

Gribova Valeriya Viktorovna, orcid.org/0009-0203-2514-7755, DSc, laboratory head,
Institute for Automation and Control Processes FEB RAS,
5, Radio Str., Vladivostok, 690041, Russia,
e-mail: gribova@iacp.dvo.ru

Fedorishchev Leonid Aleksandrovich, orcid.org/0009-0203-2514-7755, PhD, researcher,
Institute for Automation and Control Processes FEB RAS,
5, Radio Str., Vladivostok, 690041, Russia,
e-mail: fleo1987@mail.ru

Acknowledgments:
The work is partially supported by the RFBR grant No.16-07-00340-a.