

Е.А. НУРМИНСКИЙ

## РАВНОВЕСНЫЙ АНАЛИЗ СЕВЕРНЫХ ТРАНСПОРТНЫХ КОРИДОРОВ АЗИЯ-ЕВРОПА

***Анотація.** У роботі розглянута модель транспортної потокової рівноваги для основних залізничних маршрутів, що поєднують Північно-Східну Азію з Європою. Особлива увага приділена перспективам завантаження Транссибірської магістралі в конкурентній ситуації з іншими маршрутами.*

***Ключові слова:** модель, потік, рівновага, транспортна система, граф.*

***Аннотация.** В работе рассмотрена модель транспортного потокового равновесия для основных железнодорожных маршрутов, соединяющих Северо-Восточную Азию с Европой. Особое внимание уделено перспективам загрузки Транссибирской магистрали в конкурентной ситуации с другими маршрутами.*

***Ключевые слова:** модель, поток, равновесие, транспортная система, граф.*

***Abstract.** The transportation equilibrium model for major railways connecting North-East Asia and Europe is considered. The special attention is given to forecasts of transit flow on Transsiberian railway under competition with the other routes.*

***Keywords:** model, flow, equilibrium, transportation system, graph.*

### Введение

Согласно Транспортной стратегии Российской Федерации (РФ) на период до 2030 года [1] одной из целей транспортной политики государства является интеграция в мировое транспортное пространство, реализация транзитного потенциала страны. В этой связи значительное внимание уделяется планам развития международных транспортных коридоров, среди которых выделяется широтные железнодорожные пути, позволяющие достаточно быстро доставлять грузы из Северо-Восточной Азии (СВА) в Европу по территории РФ. В настоящее время существует несколько основных маршрутов этого типа, относящихся к группе «северных» и использующих в различной степени элементы Транссибирской магистрали (ТСМ). В связи с этим Транспортная стратегия РФ предусматривает масштабные транспортные проекты, направленные на увеличение к 2030 году по сравнению с 2010 годом общего объема транзитных перевозок железнодорожным транспортом более чем в 2.3 раза. Еще более масштабный относительный рост планируется по ТСМ – более чем в 14 раз по общему объему и почти в 9 раз по контейнерным перевозкам. В результате доля российских железнодорожных перевозок по ТСМ должна составить к 2030 году около 2% всех перевозок СВА-Европа. Вместе с тем другими мировыми экономическими агентами реализуются планы так называемого «нового Великого Шелкового пути», что может оказать существенное влияние на эффективность вложений в транспортную инфраструктуру Сибири и Дальнего Востока. Одним из способов оценить эффекты конкурентной борьбы в международных перевозках является рассмотрение ситуации в рамках моделей экономического равновесия [2–3].

Для формулировки задачи экономического (транспортного) равновесия будет рассмотрена группа так называемых северных транспортных коридоров Азия-Европа проекта TAR [4], использующие железнодорожные пути, представленные на рис. 1.

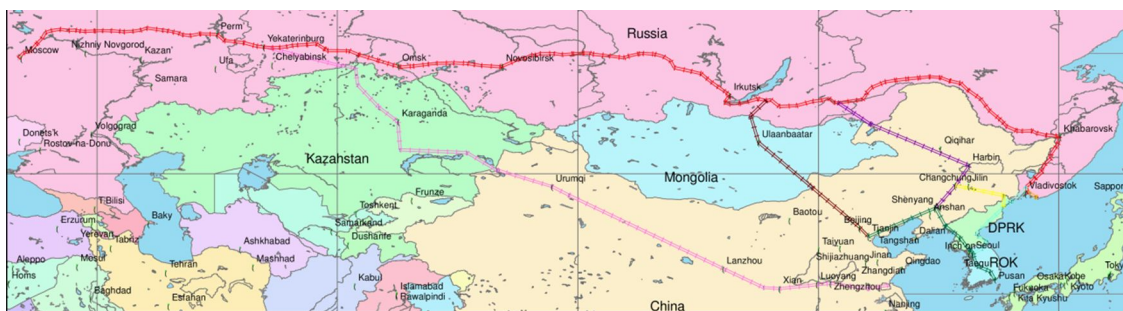


Рисунок 1 – Северные железнодорожные транспортные пути Азия-Европа проекта TAR

В качестве пункта назначения для всех коридоров подразумевается Москва, что не имеет особого значения при общей длине маршрутов порядка 10 тыс км. Согласно классификации UN ESCAP эти коридоры представляются 8 маршрутами, основные характеристики которых приведены в табл. 1.

Таблица 1 – Основные характеристики контейнерных перевозок северных транспортных коридоров Азия-Европа проекта TAR

Коридор	Пункт отправления	Длина (км)	Поток тыс. TEU)
Route1	Находка Восточная	9337	28.3
Route2	Линьюнган (Lyanngang)	7643	2
Route3	Тяньцзинь (Tiantzin)	7394	1.3
Route4v1	Пусан (Busan)	9080	1
Route4v2	Пусан (Busan)	10472	2.1
Route4v3	Пусан (Busan)	9016	1
Route5v1	Раджин (Rajin)	9388	2.1
Route5v2	Раджин (Rajin)	8237	2.7

Надо отметить, что деление на маршруты довольно условно, многие из них имеют общие участки и, вообще говоря, на существующей транспортной сети можно выделить существенно больше вариантов доставки грузов из северо-восточной Азии в Европу. В качестве комментария к данной таблице можно заметить доминирование TCM (Route1), как и то, что общие объемы железнодорожных перевозок составляют весьма малую долю морских. Это объясняется большей стоимостью железнодорожных перевозок, что оставляет им относительно скромный объем срочных поставок.

Для упрощения задачи линейные участки транспортной сети сводились к одному ребру, в результате граф сети помимо терминальных узлов, приведенных в табл. 1 содержит транзитные узлы, приведенные в табл. 2.

Таблица 2 – Список транзитных населенных пунктов

№	Наименование	Широта	Долгота	Колея
1	2	3	4	5
9	Екатеринбург	56.858844	60.604122	1520
28	Улан-Удэ	51.833333	107.616667	1520
31	Карымское	51.615	114.35	1520
40	Уссурийск	43.8	131.95	1520
41	Владивосток	43.116667	131.9	1520
42	Угловая	43.298889	132.063611	1520
70	Шэньян (Shenyang)	41.795556	123.448056	1435

1	2	3	4	5
77	Сеул (Seoul)	37.583333	127	1435
86	Чхонджин (Chongjin)	41.8	129.783333	1435
95	Чанчунь (Changchun)	43.883333	125.316667	1435

## 1. Математическая модель конкурентного потокового равновесия

В рамках этой модели транспортная система рассматривается как ориентированный или неориентированный граф  $G=(V,E)$ , где  $V$  – станции,  $E$  – перегоны. Каждый перегон  $e \in E$  задается упорядоченной парой  $(v_1, v_2)$  где  $v_1, v_2 \in V$  задают начальный и конечный пункты перегона. Пары  $(v_1, v_2)$  и  $(v_2, v_1)$  задают пути противоположной направленности при наличии двустороннего движения.

В множестве  $V$  выделены рынки производства  $S \subset V$  и потребления  $D \subset V$ , которые транспортная система должна обслуживать. В простейшей постановке задаются фиксированные объемы перевозок  $d_w$  между каждой парой  $w=(s,d)$ , где  $s \in S, d \in D$ .

Перевозки осуществляются по маршрутам  $p$ , которые представляют собой последовательности станций  $p=(v_0, v_1, \dots, v_k)$  с  $v_0 \in S, v_k \in D$  или перегонов  $p=(e_0, e_1, \dots, e_{k-1})$  где  $e_i=(v_i, v_{i+1}) \in E, i=0, 1, \dots, k-1$ ; Количество станций или перегонов конечно меняется от маршрута к маршруту. Каждый перегон характеризуется своими техническими параметрами, которые определяют временные или иные затраты, связанные с транспортировкой единицы груза по этому перегону.

Учитывая то, что по сути дела единственным конкурентным преимуществом железнодорожных перевозок является фактор времени (см., например, подробное обсуждение в [4]) в данной работе именно временные затраты рассматриваются как основной показатель.

В то время как тарифные затраты зависят в основном лишь от длины перегона, временные в общем случае зависят от того насколько данный перегон загружен. Если обозначить нагрузку на перегон  $e$  через  $y_e$  то временные затраты можно в первом приближении описать функцией  $\tau_e(y_e)$ , а суммарные временные затраты на транспортировку единицы груза (удельные транспортные задержки) по маршруту  $p$  как сумму затрат по перегонам этого маршрута

$$t_p(y) = \sum_{e \in p} \tau_e(y_e),$$

где вектор  $y=(y_e, e \in E)$  описывает загрузку всей сети.

Вектор загрузок  $y$  является результатом распределения заказов на перевозку между маршрутами, соединяющими рынки потребления и спроса, а именно

$$y_e = \sum_{p \in P^e} x_p,$$

где  $x_p$  – объем перевозок по маршруту  $p$ ,  $P^e$  – множество маршрутов, содержащих ребро  $e$ . В терминах потоковых переменных  $x_p, p \in P$  особенно легко записываются транспортные балансы:

$$\sum_{p \in P^w} x_p = q_w, \quad w \in W, \quad (1)$$

где  $w=(s,d)$  – пара источник-сток, для которой задан объем перевозок  $q_w$ ,  $P_w$  – множество маршрутов, соединяющих  $s$  и  $d$ . Вдобавок, от переменных  $x_p$  можно легко перейти к  $y_e$ , обратная операция, вообще говоря, неоднозначна. Недостатком формулировки модели в терминах потоковых переменных является их потенциально экспоненциальное количество, однако на практике это можно преодолевать с помощью различных вычислительных стратегий.

Принцип конкурентного распределения потоков заключается в том, что каждый маршрут рассматривается как независимый выбор экономических агентов, осуществляющих перевозки, причем единственным критерием выбора того или иного маршрута являются временные затраты на передвижение груза. Поскольку эти временные затраты зависят от степени и характера распределения загрузки возникает обратная связь между решениями, принимаемыми агентами и их затратами. Равновесным распределением потоков называется такое, при котором ни один агент не может уменьшить свое время доставки при условии, что остальные участники не изменяют своих решений.

Фактически в этих условиях будут использоваться лишь маршруты минимизирующие стоимость или время доставки: обозначим

$$t_w^*(x) = \min_{p \in P_w} t_p(x)$$

тогда для равновесного распределения  $x^*$  будет иметь место следующее свойство: если  $x_p^* > 0$ ,  $p \in P_w$  то  $t_p(x^*) = t_w^*(x^*)$ , что можно записать в виде условия комплементарности

$$x_p^* T_p(x^*) = 0, x_p^* \geq 0, T_p(x^*) \geq 0 \text{ для всех } p \in P, \quad (2)$$

где  $T_p(x^*) = t_p(x^*) - t_w^*(x^*)$  при  $p \in P_w$  и  $x^*$  удовлетворяет балансовым соотношениям (1).

Задачу (2) можно переформулировать в виде вариационного неравенства:

$$\sum_{p \in P} T_p(x^*)(x - x^*) \geq 0 \quad (3)$$

для всех  $x$  удовлетворяющим (1), что предоставляет некоторые преимущества для разработки численных методов.

## 2. Фактографическое обеспечение моделей

После приведения линейных участков графа к одному ребру результирующий граф выглядит как показано на рис. 2.

Для этой транспортной сети в качестве пунктов генерации транспортного потока было выбрано 5 терминальных узлов в США (Находка-Восточная (NV), Линьюнган (LuanYungang), Тяньцзинь (Tiantzin), Пусан (Busan) и Раджин (Rajin), после чего сформировано 27 теоретически возможных транспортных маршрутов, приведенных в табл. 3.

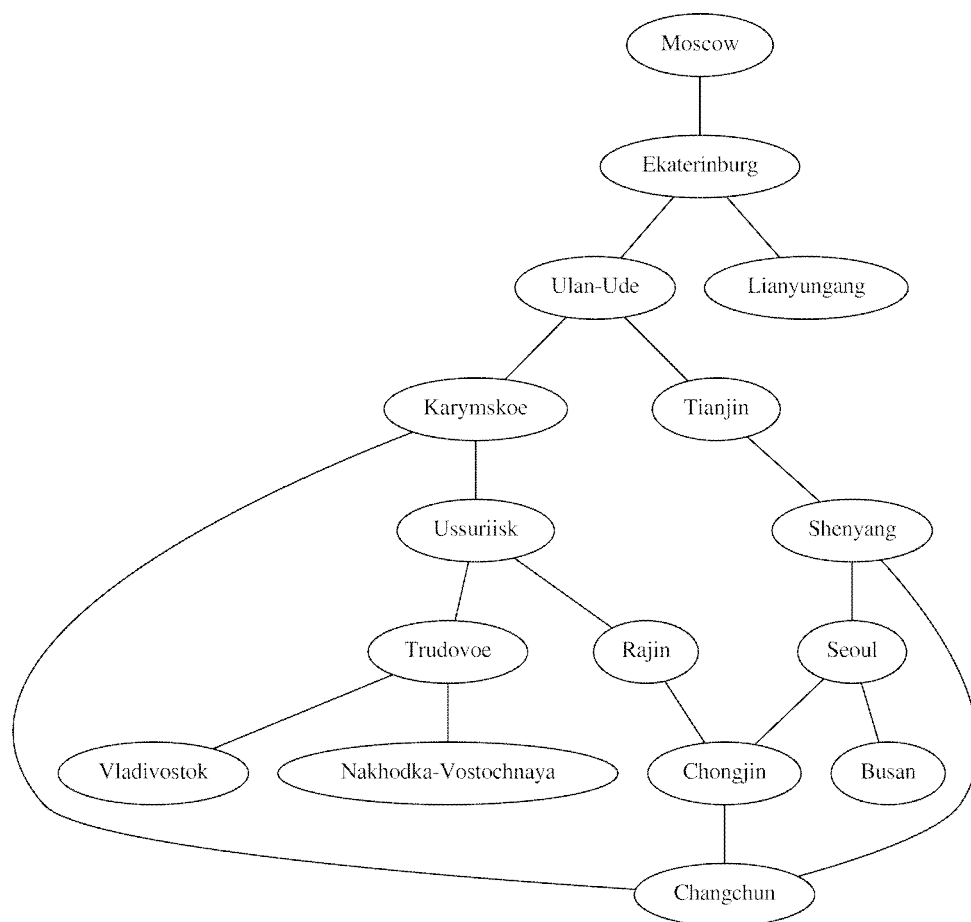


Рисунок 2 – Обобщенная модель северных коридоров

Таблица 3 – Список маршрутов

$t_f$  – время свободного пробега (часов),  $t_r$  – фактическое время пробега (часов)

№	Длина	$t_f$	$t_r$	Маршрут
1	2	3	4	5
1	9485.47	94.46	137.93	Moscow Ekaterinburg Ulan-Ude Karymskoe Ussuriisk Trudovoe NV
2	11527	117.16	184.77	Moscow Ekaterinburg Ulan-Ude Karymskoe Ussuriisk Rajin Chongjin Seoul Shenyang Tiantzin
3	10578	108.04	166.55	Moscow Ekaterinburg Ulan-Ude Karymskoe Ussuriisk Rajin Chongjin Seoul Busan
4	10973	110.24	170.92	Moscow Ekaterinburg Ulan-Ude Karymskoe Ussuriisk Rajin Chongjin Changchun Shenyang Tiantzin
5	11756	114.02	178.5	Moscow Ekaterinburg Ulan-Ude Karymskoe Ussuriisk Rajin Chongjin Changchun Shenyang Seoul Busan
6	9490	97.71	145.9	Moscow Ekaterinburg Ulan-Ude Karymskoe Ussuriisk Rajin
7	8594	79.49	122.37	Moscow Ekaterinburg Ulan-Ude Karymskoe Changchun Shenyang Tiantzin
8	9377	83.27	129.95	Moscow Ekaterinburg Ulan-Ude Karymskoe Changchun Shenyang Seoul Busan

1	2	3	4	5
9	10370.47	100.57	163.07	Moscow Ekaterinburg Ulan-Ude Karymskoe Changchun Shenyang Seoul Chongjin Rajin Ussuriisk Trudovoe NV
10	9749	91.17	145.73	Moscow Ekaterinburg Ulan-Ude Karymskoe Changchun Shenyang Seoul Chongjin Rajin
11	10470	98.20	159.82	Moscow Ekaterinburg Ulan-Ude Karymskoe Changchun Chongjin Seoul Shenyang Tiantzin
12	9521	89.09	141.6	Moscow Ekaterinburg Ulan-Ude Karymskoe Changchun Chongjin Seoul Busan
13	9216.47	90.47	142.85	Moscow Ekaterinburg Ulan-Ude Karymskoe Changchun Chongjin Rajin Ussuriisk Trudovoe NV
14	8595	81.05	125.52	Moscow Ekaterinburg Ulan-Ude Karymskoe Changchun Chongjin Rajin
15	9719	85.43	136.77	Moscow Ekaterinburg Ulan-Ude Tiantzin Shenyang Seoul Busan
16	10712.47	102.75	169.88	Moscow Ekaterinburg Ulan-Ude Tiantzin Shenyang Seoul Chongjin Rajin Ussuriisk Trudovoe NV
17	10091	93.33	152.55	Moscow Ekaterinburg Ulan-Ude Tiantzin Shenyang Seoul Chongjin Rajin
18	15419.47	141.43	234.37	Moscow Ekaterinburg Ulan-Ude Tiantzin Shenyang Seoul Chongjin Changchun Karymskoe Ussuriisk Trudovoe NV
19	15424	144.68	242.33	Moscow Ekaterinburg Ulan-Ude Tiantzin Shenyang Seoul Chongjin Changchun Karymskoe Ussuriisk Rajin
20	13543.47	122.72	196.92	Moscow Ekaterinburg Ulan-Ude Tiantzin Shenyang Changchun Karymskoe Ussuriisk Trudovoe NV
21	14636	136.3	225.53	Moscow Ekaterinburg Ulan-Ude Tiantzin Shenyang Changchun Karymskoe Ussuriisk Rajin Chongjin Seoul Busan
22	13548	125.97	204.88	Moscow Ekaterinburg Ulan-Ude Tiantzin Shenyang Changchun Karymskoe Ussuriisk Rajin
23	10463	94.45	154.78	Moscow Ekaterinburg Ulan-Ude Tiantzin Shenyang Changchun Chongjin Seoul Busan
24	10158.47	95.83	156.03	Moscow Ekaterinburg Ulan-Ude Tiantzin Shenyang Changchun Chongjin Rajin Ussuriisk Trudovoe NV
25	9537	86.41	138.7	Moscow Ekaterinburg Ulan-Ude Tiantzin Shenyang Changchun Chongjin Rajin
26	8054	73.88	113.68	Moscow Ekaterinburg Ulan-Ude Tiantzin
27	8482	67.11	123.35	Moscow Ekaterinburg Lianyungang

Для построения функции задержки  $t_e(y)$  ребра  $e$  использовалась ее линейная аппроксимация вида  $t_e(y) = a_e + b_e y$ , где константа  $a_e$  может быть интерпретирована как задержка при свободном движении, а  $b_e$  оценивалось по реальным временам проезда по участкам дорог с соответствующими оценками плотности движения. Числовые значения, использованные в модели, приведены в табл. 4

Таблица 4 – Параметры функций задержек

$t_f$  – время свободного перемещения по участку,  $t_r$  – фактическое время перемещения по участку

Участок	Длина	$t_f$	$it_r$
Moscow-Ekaterinburg	1814	18:08	25:25
Ekaterinburg-Ulan-Ude	3827	37:52	52:32
Ulan-Ude-Karymskoe	654	6:32	10:35
Karymskoe-Ussuriisk	2882	28:49	44:43
Ussuriisk-Trudovoe	78	0:47	1:16
Trudovoe-Vladivostok	34	0:20	0:41
Trudovoe-Nakhodka-Vostochnaya	230	2:18	3:25
Ekaterinburg-Lianyungang	6668	48:58	97:56
Ulan-Ude-Tianjin	2413	17:52	35:44
Tianjin-Shenyang	441	3:53	7:45
Shenyang-Seoul	866	6:27	12:54
Seoul-Busan	358	1:13	2:26
Ussuriisk-Rajin	313	6:20	12:39
Rajin-Chongjin	81	1:09	2:17
Seoul-Chongjin	649	7:58	15:56
Karymskoe-Changchun	1558	11:27	22:54
Shenyang-Changchun	300	1:36	3:11
Chongjin-Changchun	661	5:54	11:48

### 3. Результаты вычислений

Для вычисления равновесных транспортных потоков был применен проективный метод, который сводит поиск решения вариационного неравенства (3) к решению проективного уравнения

$$x^* = \Pi_X(x^* - \lambda T(x^*)), \quad (4)$$

где  $\Pi_X$  – оператор проекции на множество  $X$ , задаваемое балансовыми условиями (1), шаговый множитель  $\lambda > 0$ , а  $T(\cdot)$  – вектор-функция с компонентами  $T_p(\cdot), p \in P$ .

Проективный метод представляет собой фактически метод простой итерации, примененный к проективному уравнению (4):

$$x^{k+1} = \Pi_X(x^k - \lambda_k T(x^k)), k=0, 1, \dots \quad (5)$$

и обеспечивает, при довольно необременительных предположениях, сходимость  $x^k \rightarrow x^*$ .

Применение этого метода к решению задачи поиска равновесных потоков для сети северных коридоров продемонстрировано на рис. 3.

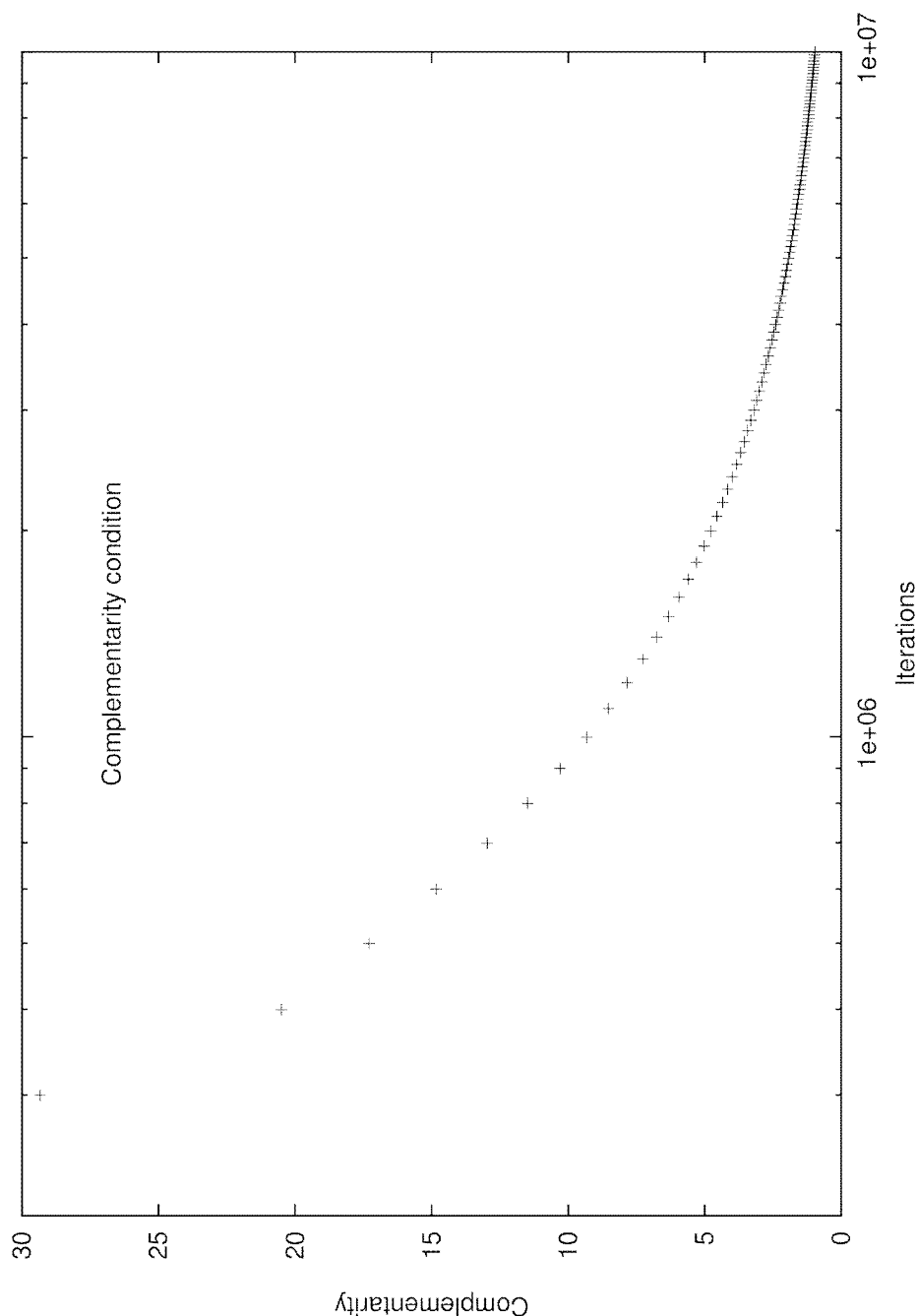
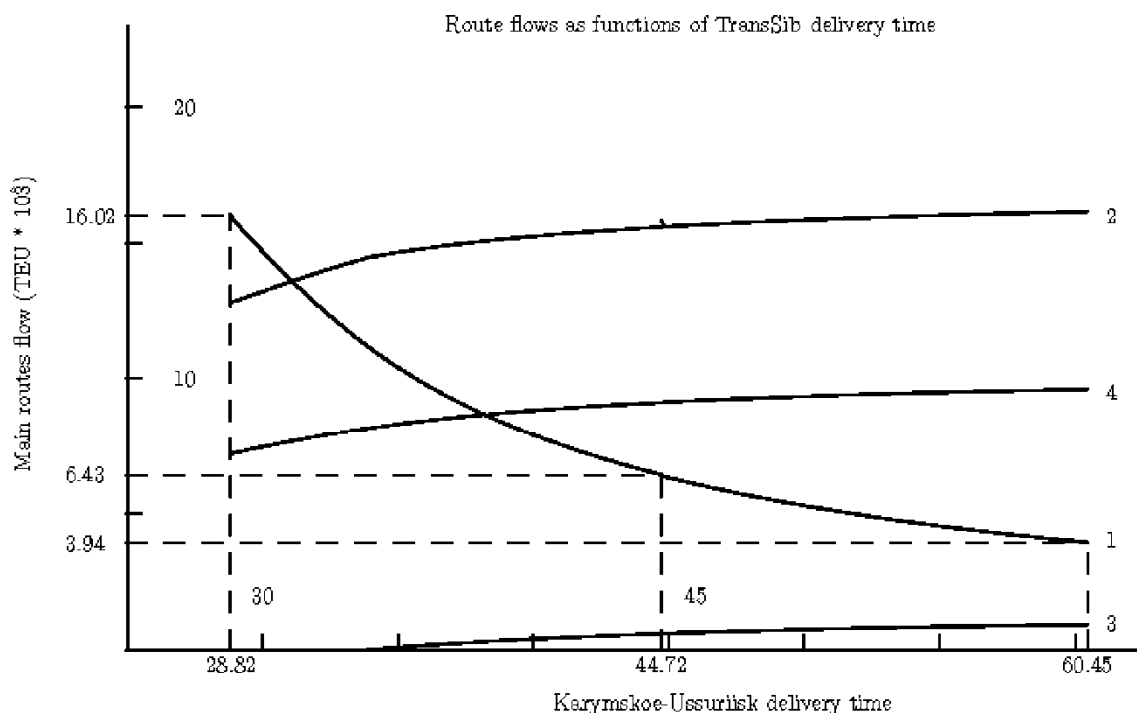


Рисунок 3 – Сходимость к равновесию проективного метода

На этом рисунке видно, что хотя алгоритм и сходится, скорость его сходимости довольно медленная и к тому же замедляющаяся при приближении к равновесию. Несомненно должны быть продолжены поиски более эффективных численных процедур.

Тем не менее, проективный метод обеспечил проведение масштабного вычислительного эксперимента, в котором исследовалось влияние перспективной модернизации ТСМ на распределение потоков между конкурирующими коридорами. В этом эксперименте увеличивалась средняя коммерческая скорость движения контейнерных поездов по одному из ключевых участков ТСМ (Карымское-Уссурийск) вплоть до достижения максимально технически возможной, которая принималась равной 100 км/час.





- 1: Moscow-Ekaterinburg-Ulan-Ude-Karymskoe-Ussuriisk-Trudovoe-Nakhodka-Vostochnaya.
- 2: Moscow-Ekaterinburg-Ulan-Ude-Karymskoe-Changchun-Shenyang-Tianjin
- 3: Moscow-Ekaterinburg-Ulan-Ude-Karymskoe-Changchun-Shenyang-Seoul-Busan
- 4: Moscow-Ekaterinburg-Ulan-Ude-Karymskoe-Changchun-Chongjin-Rajin

Рисунок 4 – Загрузка маршрутов

Результаты вычислений графически представлены на рис. 4. Следует сразу отметить, что во всем диапазоне вычислений ненулевые потоки были обнаружены только у 5 маршрутов, приведенных в табл. 5.

Таблица 5 – Реально используемые маршруты  
min – минимальный поток по маршруту, max – максимальный

Код марш.	Опорные пункты маршрутов	min	max
TAR-01	Moscow Ekaterinburg Ulan-Ude Karymskoe Ussuriisk Trudovoe Nakhodka-Vostochnaya	3.9044	16.7680
TAR-07	Moscow Ekaterinburg Ulan-Ude Karymskoe Changchun Shenyang Tianjin	13.3047	16.5618
TAR-14	Moscow Ekaterinburg Ulan-Ude Karymskoe Changchun Chongjin Rajin	8.8280	9.4162
TAR-26	Moscow Ekaterinburg Ulan-Ude Tianjin	30.5305	35.0297
TAR-27	Moscow Ekaterinburg Lianyungang	33.6694	34.9415

## Заключение

Проведен анализ распределения контейнерного грузопотока СВА-Европа с точки теории экономического равновесия. Вычислительный эксперимент показывает, что при максимально технически возможных параметрах контейнерных перевозок доля ТСМ может возрасти максимально до примерно 20% общего объема перевозок СВА-Европа. Дополнительное увеличение трафика может принести дополнительные транспортные коммуникации, среди которых, согласно [5], находятся следующие транспортные соединения: Хабаровск – Самарга; Комсомольск-на-Амуре – Находка; Владивосток – СовГавань; Февральск – Магадан – Петропавловск-Камчатский; Япония – Сахалин –

материк. Представляется интересным провести вычислительные эксперименты с различными политиками ввода в строй и этих линий, однако это требует дополнительных исследований.

Автор отмечает помощь А.П. Мартюшева (ДВФУ) в сборе данных по параметрам транспортной сети и проведении вычислительных экспериментов.

Работа проводится в рамках федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 годы», Соглашение № 14.604.21.0052 от 30.06.2014 г. с Минобрнаукой. Уникальный идентификатор проекта RFMEFI60414X0052.

## **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Транспортная стратегия РФ на период до 2030 года, 496 с. [Электронный ресурс] // URL:<http://rosavtodor.ru/documents/transport-strategy-2030/> (дата обращения: 18.11.2014).
2. Fernandez-Larranaga, J.E. Equilibrium Predictions in Transportation Markets: The State of the Art, Universidad Catolica de Chile. Departamento Ingenieria de Transporte, 1980.
3. Fernandez J.E., De Cea J., Ricardo G. A strategic model of freight operations for rail transportation systems Transportation Planning and Technology, 2004, 27(4), 231 – 260.
4. Винокуров Е. Ю., Джадралиев М.А., Щербанин Ю.А. Международные транспортные коридоры ЕвразЭС: быстрее, дешевле, больше [Электронный ресурс] // Отраслевой обзор, – Алматы, Евразийский банк развития. 2009. 4. С. 1 – 60. URL: [http://www.eabr.org/general/upload/docs/publication/analyticalreports/Full\\_report\\_5\\_2009.pdf](http://www.eabr.org/general/upload/docs/publication/analyticalreports/Full_report_5_2009.pdf) (дата обращения: 15.11.2014).
5. Романов М.Т. Территориальная организация хозяйства слабоосвоенных регионов России Владивосток: Дальнаука, 2009. – 318 с.

*Стаття надійшла до редакції 21.11.2014*